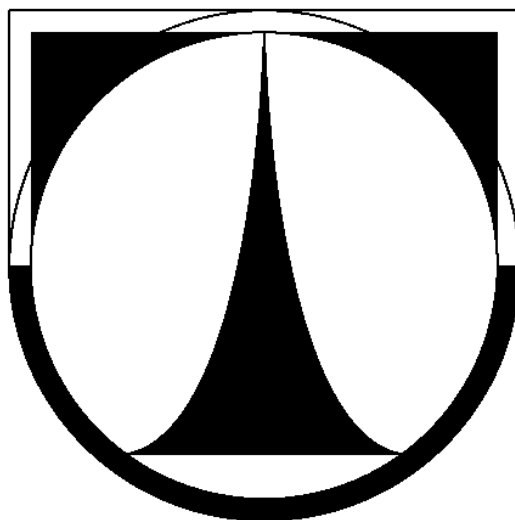


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

---

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

# Diplomová práce



Ondřej Trávník

Model hydraulické části pružicího a tlumicího  
prvku pro závěs kola automobilu

Model of hydraulic part of vehicle suspension unit

LIBEREC 2004

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Katedra řídicí techniky  
2003/2004

Akademický rok:

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro: **Ondřeje Trávníka**

studijní program: M 2612 – Elektrotechnika a informatika

obor: 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona o vysokých školách č.111/1998 Sb. určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu:

### **Model hydraulické části pružicího a tlumicího prvku pro závěs kola automobilu**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s již vypracovaným matematickým modelem hydropneumatického pružicího a tlumicího prvku, který se svým chováním značně odlišuje od měření na skutečném prvku.
2. Analyzujte a vyhledejte možné nepřesnosti hydraulické části tohoto modelu.
3. Navrhněte a proveďte další upřesňující měření na hydraulické části pružicího a tlumicího prvku.
4. Vyhodnoťte tato měření a upravte model.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 až 50 stran

Seznam odborné literatury:

- [1] Noskievič P.: Modelování a identifikace systémů, Montanex a.s., 1999
- [2] Brdička M.: Mechanika kontinua, Naklad. ČSAV, Praha 1959
- [3] Bird R.B., Stewart W.E., Lighfoot E.N.: Přenosové jevy, ACADEMIA, Praha 1968
- [4] Souček P.: Elektrohydraulické servomechanismy, skripta ČVUT, fak. strojní, Praha 1992
- [5] Cohorna P.: Identifikace hydropneumatického tlumicího a pružicího prvku osobního automobilu. Diplomová práce, TU v Liberci 2003
- [6] Kupka L., Trávník O.: Identifikace hydropneumatického aktivního tlumicího a pružicího členu v závěsu kola automobilu, Projekt, TU v Liberci 2003

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Bedřich Janeček, CSc.

Konzultant: Doc. Ing. Jaromír Barbora, CSc.

Prof. RNDr. Jan Šklíba, CSc.

Zadání diplomové práce: **23. 10. 2003**

Termín odevzdání diplomové práce: **21. 5. 2004**

L.S.

.....  
Ing. Libor Tůma, CSc.

Vedoucí katedry

.....  
Doc. Dr. Ing. Jiří Maryška, CSc.

Děkan

V Liberci dne 23.10.2003

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé DP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci dne .....

.....  
Ondřej Trávník

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval Doc. Ing. Bedřichovi Janečkovi, CSc., vedoucímu diplomové práce, za pomoc a vedení v průběhu tvorby této diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval Doc. Ing. Jaromírovi Barborovi, CSc. za poskytnutí cenných praktických a odborných rad týkajících se měření a prací na zpřesnění modelu.

Všem zaměstnancům Hydrodynamické laboratoře za pomoc při realizaci a v průběhu experimentálních měření.

## **ANOTACE**

Diplomová práce se zabývá zpřesněním již existujícího matematického modelu hydraulické části pružícího a tlumícího prvku.

Prvním úkolem bylo analyzovat již sestavený model a navrhnout další kroky k jeho optimalizaci, kdy hlavním předpokladem se stalo měření charakteristik třívlnného vlnovce, který je základním stavebním kamenem hydraulické části. Dále jsme se zabývali samotnou strukturou modelu a vyhledáním nepřesností v rovnicích popisujících model. Byl také sestaven nový matematický popis vlastností vlnovců. Dalším krokem bylo implementovat naměřená data do modelu v prostředí MATLAB 6.5. Na závěr diplomové práce je uvedeno porovnání sestavených modelů a jejich zhodnocení.

## **ANNOTATION**

The diploma thesis deals with an improvement of already existing mathematical model of a hydraulic unit of the suspension strut.

The first task was to analyze already assembled model and to project further steps for its optimalization, when a principal assumption was a measurement of three-wave bellows characteristic that is a fundamental building-stone of the hydraulic unit. Furthermore, we dealt with a structure of the model itself and a selection of inaccuracies in the equations describing the model. It was also compiled a new mathematical description of bellows properties. The next step was to implement measuring data into the model in the MATLAB 6.5. In the conclusion of the diploma thesis there is stated a comparison of the assembled models and theirs evaluation.

# Seznam označení

$x$	zdvih
$S_{e1}$	efektivní plocha dolního dvojvlnovce
$S_{e3}$	efektivní plocha horního dvojvlnovce
$h_1$	výška dolního dvojvlnovce
$h_3$	výška horního dvojvlnovce
$h_0$	zástavbová výška dvojvlnovce
$h_{min}$	minimální výška dvojvlnovce při stlačení dle katalogu
$h_{max}$	maximální výška dvojvlnovce při roztažení dle katalogu
$V_1$	objem dolní komory hydraulického obvodu
$V_3$	objem horní komory hydraulického obvodu
$V_0$	objem vlnovce v zástavbové výšce
$p_1$	tlak kapaliny v dolní komoře hydraulického obvodu
$p_3$	tlak kapaliny v horní komoře hydraulického obvodu
$p_{V1}, p_{V2}$	tlak kapaliny ve vlnovci
$\rho$	hustota oleje v hydraulickém obvodu
$Q_T$	objemový tok kapaliny tryskou
$Q_S$	objemový tok kapaliny servoventilem
$Q_V$	celkový průtok odporovým vedením
$\alpha_{13}$	ztrátový součinitel průtoku oleje tryskou z dolní do horní komory
$\alpha_{31}$	ztrátový součinitel průtoku oleje tryskou z horní do dolní komory
$\alpha_S$	ztrátový součinitel průtoku oleje servoventilem
$K$	modul objemové pružnosti oleje ve vlnovci
$a_0, a_1, \dots, a_5$	koefficienty regresních polynomů u modelu A
$a, b, c, d, e, g, h$	koefficienty rovnice plochy pro objem u modelu B
$a_S, b_S, c_S, \dots, h_S$	koefficienty rovnice plochy pro efektivní plochu u modelu B
$z_1$	otevření servoventilu
$F_1, F_3, F$	silové účinky hydraulického obvodu a jednotlivých komor
$K_{sv}$	zesílení servoventilu
$u_{sv}$	řídící napětí servoventilu
$T_{sv}$	časová konstanta servoventilu
$\xi_{sv}$	tlumicí konstanta servoventilu

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ .....</b>	<b>9</b>
2.1	Konstrukční uspořádání sestavy .....	9
2.2	Konstrukční uspořádání hydraulické části .....	9
<b>3</b>	<b>MATEMATICKÝ POPIS .....</b>	<b>12</b>
3.1	Náhradní schéma hydraulické části .....	12
3.2	Matematický popis pracovních komor .....	13
3.2.1	Vlastnosti vlnovcových pružin .....	13
3.2.2	Vyjádření vlastností pracovních komor modelu A .....	15
3.2.3	Vyjádření vlastností pracovních komor modelu B .....	16
3.3	Průtok odporovým vedením .....	19
3.3.1	Průtok kapaliny tryskou .....	19
3.3.2	Průtok kapaliny servoventilem .....	20
<b>4</b>	<b>MĚŘENÍ .....</b>	<b>24</b>
4.1	Popis měřicí soustavy .....	25
4.2	Snímače a vlastní měření .....	29
4.3	Zpracování naměřených hodnot .....	33
<b>5</b>	<b>MODEL .....</b>	<b>38</b>
5.1	Model A .....	38
5.2	Model B .....	40
5.3	Porovnání modelů a měření .....	42
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>50</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>51</b>
	<b>PŘÍLOHA I. – VLASTNOSTI VLNOVCŮ .....</b>	<b>53</b>
	<b>PŘÍLOHA II. – MĚŘENÍ VLNOVCŮ .....</b>	<b>54</b>
	<b>PŘÍLOHA III. – MODEL B .....</b>	<b>59</b>
	<b>PŘÍLOHA IV. – POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A MODELŮ .....</b>	<b>61</b>
	<b>PŘÍLOHA V. – CD ROM</b>	



# 1 Úvod

Historie využití vlnovcových pružin k tlumení a pružení je dlouhodobá. V dnešní době, kdy se díky moderním technologiím automobilový průmysl posouvá ve svém vývoji obrovským tempem, se stává komfort jízdy jedním z důležitých parametrů nových osobních automobilů. Dnes nejčastěji řešeným problémem v oblasti tlumení a pružení je minimální přenos vibrací způsobených jízdou na vozidlo, vývoj však jde dále, a proto dochází k řešení minimalizace naklánění automobilu v zatáčkách při zachování stejných parametrů komfortu jízdy na různých typech terénu. Proto se stává aktivní tlumení a pružení dalším krokem ve vývoji.

To je pohled důležitý z hlediska uživatele, ovšem s vyvíjejícími se kompozitními materiály, především v oblasti karoserie, ale i celého automobilu, dochází k značnému odlehčení celé konstrukce automobilu. V důsledku toho se rozhodujícím parametrem pro nastavení charakteristik tlumení a pružení stává celková hmotnost pasažérů. Existuje mnoho dalších specifik v závislosti na typu automobilu.

V této práci je popsán postup při upřesňování již sestaveného modelu [4]. V první části je popsán celý pružicí a tlumicí systém, jehož součástí hydraulický systém je. Dále pak je zde uveden zevrubný popis hydraulického systému.

V druhé části je proveden matematický popis jednotlivých částí hydraulického systému, na kterém byly provedeny úpravy vůči starému popisu z [4]. Chování pracovních komor hydraulického systému bylo popsáno novým modelem vypracovaným na základě měření. Části hydraulického systému byly popsány jednotlivě a jejich interakce byla zahrnuta v modelu. Po prozkoumání starého popisu a po matematických úpravách v analytickém vyjádření chování hydraulického systému bylo navrženo zpřesňující měření. O tomto experimentálním měření pojednává třetí část diplomové práce. Byly zjištěny potřebné charakteristiky třívlnného vlnovce. Je zde popsán vlastní postup při měření a zpracování naměřených hodnot. Tato měření jsou přínosná nejen pro samostatnou diplomovou práci, ale lze jich využít i v jiných modelech, kde bude využit tento typ vlnovce.

V poslední části diplomové práce je uvedeno provedení modelů v prostředí MATLAB 6.5. Je zde jak programové schéma, tak porovnání výsledků simulace a naměřených hodnot.

## 2 Konstrukční uspořádání

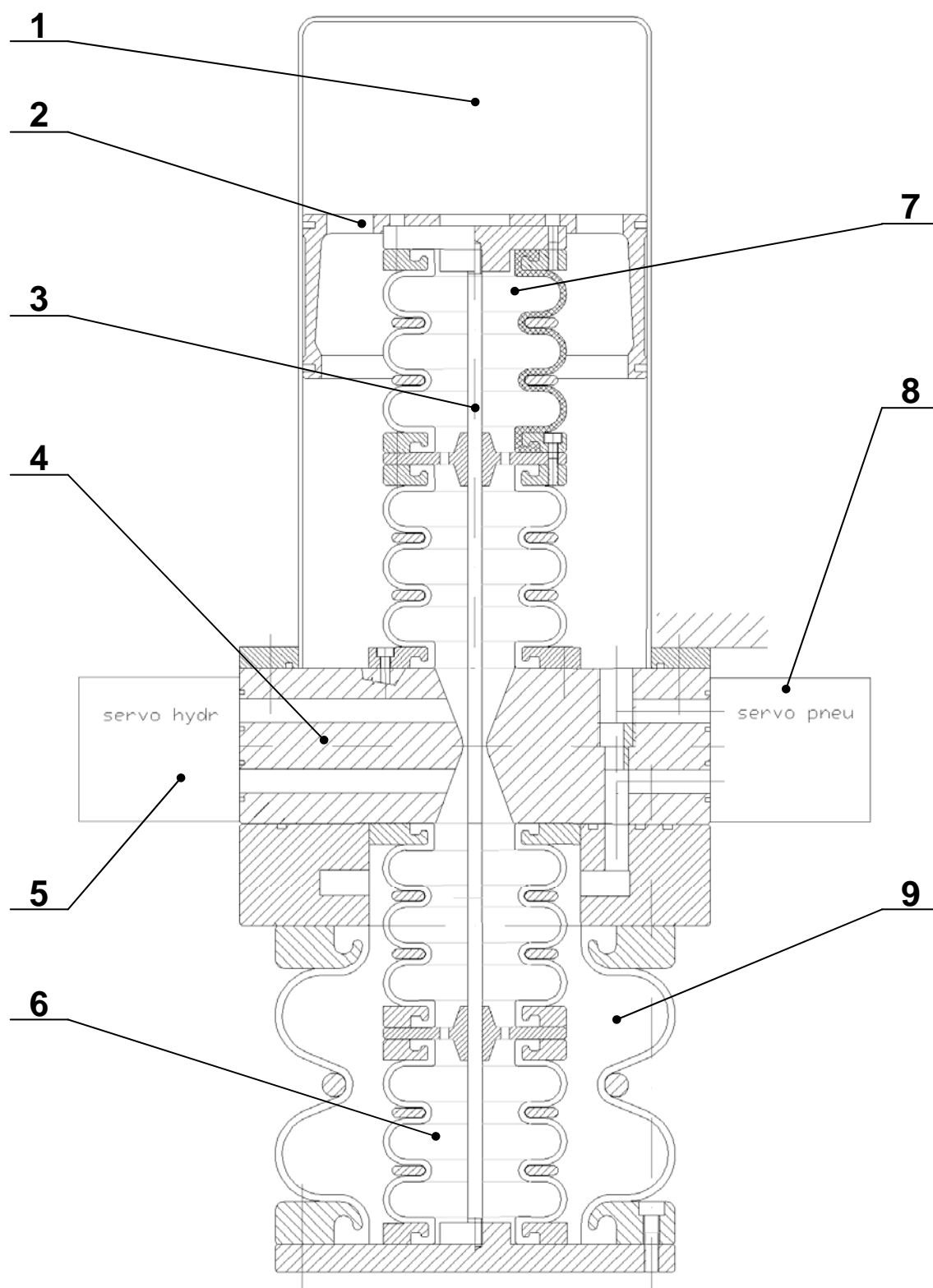
Hydraulická část, která se stala předmětem mé diplomové práce, je součástí hydropneumatického tlumičího a pružícího prvku (obr. 2.1.1), který je popsán matematickým modelem [4]. Pružící a tlumičí prvek pro závěs kola automobilu byl sestaven v hydrodynamické laboratoři na základě návrhu Prof. RNDr. Jana Šklíby, CSc. a Doc. Ing. Jaromíra Barbory, CSc. [7].

### 2.1 Konstrukční uspořádání sestavy

Sestava se skládá ze dvou pracovních částí, a to z hydraulické a pneumatické. Oba tyto systémy jsou rozděleny do dvou pracovních komor. Tyto dvě pracovní komory jsou odděleny průtokovým kanálem, ke kterému je paralelně připojeno zkratovací vedení procházející průtokovým servoventilem. Pracovní části jsou ve vzájemné interakci. Při rozdělení je nutno zahrnout vlivy této interakce. V mém případě působení proměnného tlaku pneumatické části, v níž je hydraulická část uložena. Tlak, a tedy i tuhost hydraulické části vůči pneumatické jsou tak vysoké, že působení pneumatické části na hydraulickou zanedbáváme.

### 2.2 Konstrukční uspořádání hydraulické části

Hydraulická část se skládá ze dvou pracovních komor. Každá tato komora je tvořena dvěma, v sérii zapojenými třívlnnými pružinami. Komory jsou propojeny vodící tyčí, která zajišťuje konstantní délku hydraulické části. Horní pracovní komora je se spodní propojena průtokovým kanálem přes trysku, kterou lze měnit, a tím nastavit prvotní charakteristiku tlumiče. Paralelně k průtokovému vedení přes trysku je připojeno zkratovací vedení přes hydraulický servoventil. Zapojení zkratovacího vedení přes servoventil umožňuje měnit a řídit parametry hydraulické části. Celý hydraulický systém je naplněn silikonovým olejem. Hydraulická část plní především tlumičí účinky sestavy.

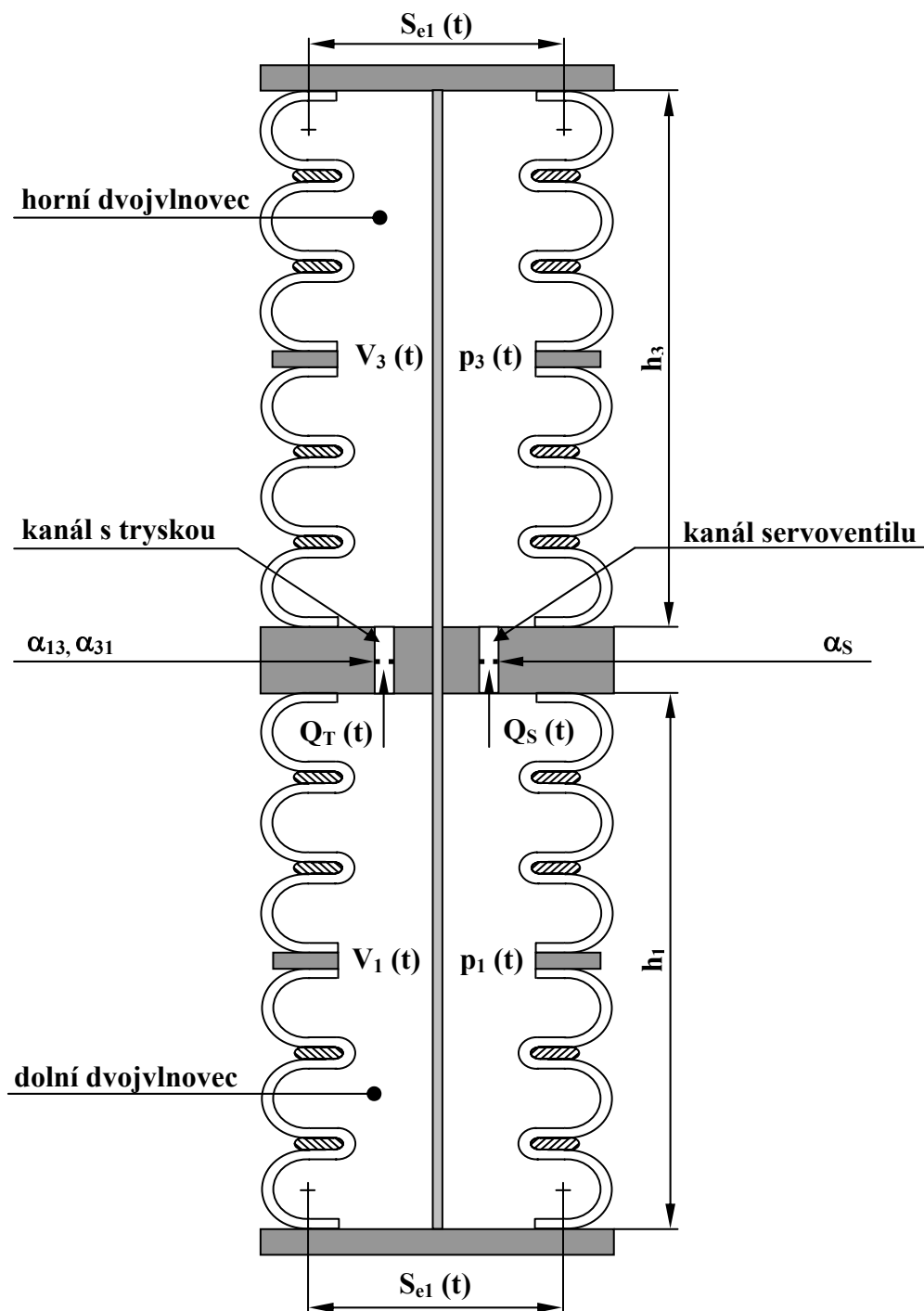


Obr: 2.1.1: Konstrukční uspořádání sestavy

1. Horní pracovní komora pneumatické části
2. Vodicí člen zajišťující stabilitu horní pracovní komory hydraulického systému
3. Vodicí tyč zajišťující konstantní délku hydraulického systému
4. Střední část obsahující propojovací kanály přes vyměnitelné trysky a zkratovací vedení k servoventilům
5. Hydraulický servoventil
6. Dolní pracovní komora hydraulického systému
7. Horní pracovní komora hydraulického systému
8. Pneumatický servoventil
9. Dolní pracovní komora pneumatického systému

### 3 Matematický popis

### 3.1 Náhradní schéma hydraulické části



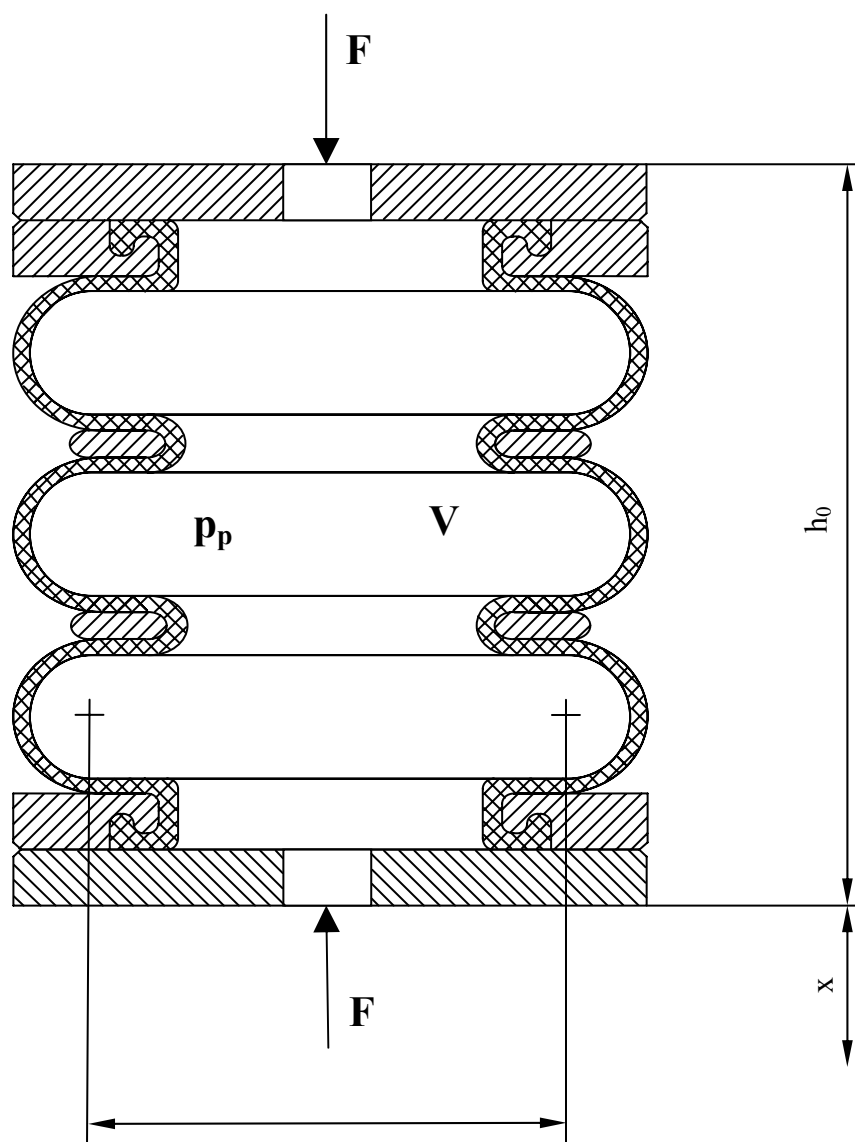
*Obr. 3.1.3: Náhradní schéma hydraulické části*

## 3.2 Matematický popis pracovních komor

Hydraulický systém je tvořen dvěma pracovními komorami. Každá tato komora se skládá ze dvou, v sérii zapojených třívlenných vlnovcových pružin.

### 3.2.1 Vlastnosti vlnovcových pružin

Pružiny použité v přípravku jsou primárně používány s plyným médiem a využití vlnovců s kapalinou není v dostupné literatuře popsáno. Vlnovec popisujeme jako rotačně symetrický elastický pryžový měch armovaný vrstvami zkřížených kordových vláken [2].



Obr. 3.4.1.1: Schéma vlnovcové pružiny

Výrobní vlastnosti vlnovce jsou uvedeny v tabulce, viz příloha I.A. Mezi tyto parametry patří zástavbová výška  $h_0$  nezatíženého vlnovce, rozsah možného statického natlakování při zástavbové výšce  $h_0$  a rozsah zdvihu  $x$ . Podrobnější popis těchto vlastností a jejich hodnot je popsán v kapitole 4.

Vlastnosti chování vlnovce a jeho účinků popisujeme efektivní plochou  $S_e$ , jež je vyjádřena podílem silového působení  $F$  a přetlaku  $p_p$  uvnitř vlnovce.

$$S_e = \frac{F}{p_p} \quad (3.2.1.1)$$

Síla  $F$  a přetlak  $p_p$  jsou závislé na zdvihu  $x$  a zároveň přetlak  $p_p$  je odvozen od počátečního natlakování. Obecně je tedy efektivní plocha vlnovce závislá na zdvihu  $x$  a přetlaku  $p_p$ . Jako charakteristika efektivní plochy ve starém modelu byla využita aproximovaná lineární funkce, protože experimentálně stanovená charakteristika neexistovala. Pro zpřesnění modelu jsme tuto charakteristiku experimentálně zjistili, viz. kapitola 4. Experimentálně zjištěnou efektivní plochu lze aproximovat polynomem. Z měření bylo stanoveno, že závislost na přetlaku je minimální, a proto tuto závislost v modelu A zanedbáváme. Dostáváme:

$$S_e(x) = \sum_{j=0}^n a_j \cdot x^j \quad (3.2.1.2)$$

Ze vztahu (3.2.1.1) můžeme vyjádřit vztah pro stanovení síly  $F$  v závislosti na zdvihu a za předpokladu aproximované charakteristiky efektivní plochy z měření

$$F(x) = S_e(h) \cdot p, \quad (3.2.1.3)$$

kde  $h$  je okamžitá výška vlnovce a  $p$  je tlak uvnitř v daný okamžik. Jestliže zavedeme orientaci zdvihu  $x$  tak, že při stlačování je jeho hodnota záporná a při roztahování kladná, můžeme napsat:

$$h = h_0 + x \quad (3.2.1.4)$$

Okamžitou změnu objemu vlnovce  $\dot{V}$  lze také vyjádřit z efektivní plochy a výšky  $h$  v závislosti na zdvihu  $x$ .

$$\dot{V} = S_e(x) \cdot h \quad (3.2.1.5)$$

### 3.2.2 Vyjádření vlastností pracovních komor modelu A

V této kapitole jsou uvedeny rovnice použité v modelu A. Tyto rovnice jsou převzaté z diplomové práce [4] a byly na nich provedeny úpravy dle oponenta a dále pak byl samotný model doplněn o experimentálně zjištěné charakteristiky závislosti objemu  $V$  a efektivní plochy  $S_e$  na zdvihu  $x$ . U tohoto modelu závislost efektivní plochy a objemu na tlaku  $p$  zanedbáváme.

Úpravy vzorců se týkají pouze formálních chyb, které neměly vliv na samotnou strukturu modelu. Ve složitosti celého modelu byly nalezeny i chyby v samotném programovém provedení těchto rovnic v prostředí MATLAB 5.3. Model byl přepracován v prostředí MATLAB 6.5. a tyto chyby byly opraveny. Rovnice zde uvedené jsou již upravené pro model A.

Rovnice (3.2.2.1) a (3.2.2.2) charakterizují vyjádření změn tlaků v pracovních komorách hydraulického systému, kde indexem jedna označíme dolní dvojvlnovec a indexem tři horní dvojvlnovec.

$$\dot{p}_1 = \frac{K}{V_1} \cdot (-\dot{V}_1 - Q_v) \quad (3.2.2.1)$$

$$\dot{p}_3 = \frac{K}{V_3} \cdot (-\dot{V}_3 + Q_v) \quad (3.2.2.2)$$

$Q_v$  vyjadřuje průtok odporovým vedením, který je popsán v kapitole 3.2. Koeficient  $K$  vyjadřuje modul objemové pružnosti oleje a  $V$  reprezentuje objem pracovních komor, jež je vyjádřen v následujících rovnicích. Analogicky je použito číslování pro horní a dolní pracovní komoru jako u rovnic změn tlaků:

$$V_1 = \int_0^t (-\dot{V}_1 - Q_v) \cdot dt \quad (3.2.2.3)$$

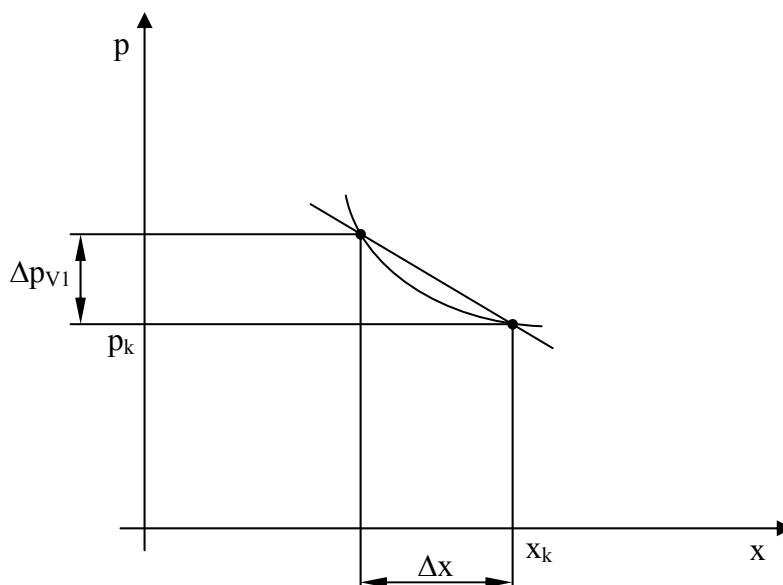
$$V_3 = \int_0^t (-\dot{V}_3 + Q_v) \cdot dt \quad (3.2.2.3)$$

Odvození neupravených vzorců je uvedeno v [4] a jejich úpravy se týkají pouze náhrady indexace. Dále pak bylo provedeno dosazení vzorce (3.3.1).



### 3.2.3 Vyjádření vlastností pracovních komor modelu B

Pro model B byl navržen nový popis chování pracovních komor. U tohoto popisu vycházíme z předpokladu rozdělení jednoho časového okamžiku na dva dílčí procesy. V prvním kroku přistoupíme k vyjádření změny tlaku v závislosti na zdvihu při konstantním objemu. To znamená, že předpokládáme v prvním kroku uzavřený průtok mezi horní a dolní komorou.



Obr. 3.2.2.1: Grafické vyjádření změny tlaku v závislosti na zdvihu při konstantním objemu pracovní komory

Na obrázku (3.2.2.1) vidíme grafické vyjádření prvního kroku popisu. Vyjádříme tedy změnu tlaku v prvním kroku, kde  $p_{V1}$  je změna tlaku při neměnném objemu pracovních komor:

$$\left( \frac{dp_{V1}}{dx} \right)_{x_k}^{V=konst.} = \frac{\Delta p_{V1}}{\Delta x}, \quad (3.2.2.1)$$

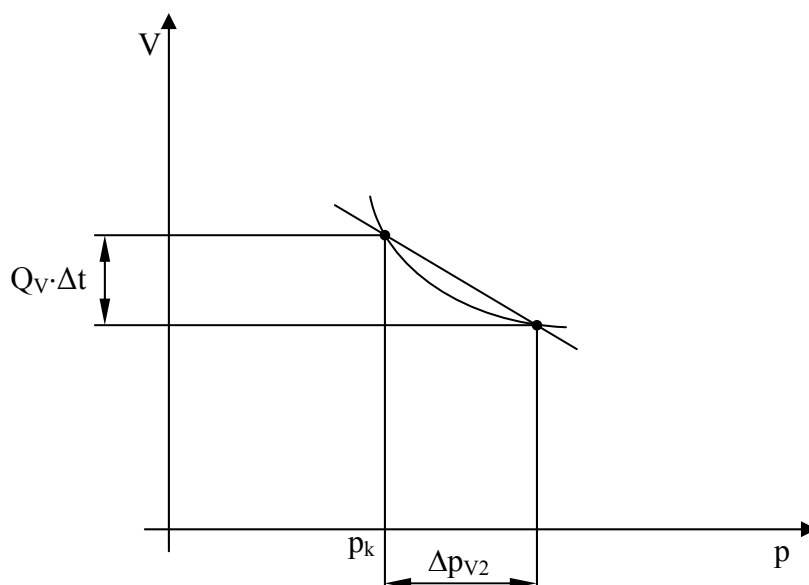
Z rovnice (3.2.2.1) vyjádříme  $\Delta p_{V1}$ :

$$\Delta p_{V1} = \left( \frac{dp_{V1}}{dx} \right)_{x_k, p_k}^{V=konst.} \cdot \Delta x \quad (3.2.2.2)$$

Změnu tlaku  $p_{V1}$  v čase získáme vynásobením rovnice (3.2.2.2) výrazem  $\frac{1}{\Delta t}$ :

$$\frac{\Delta p_{V1}}{\Delta t} = \left( \frac{dp_{V1}}{dx} \right)_{x_k, p_k}^{V=\text{konst.}} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.2.2.3)$$

V druhém kroku vyjádříme změnu tlaku v komorách v závislosti na změně objemu při konstantním zdvihu  $x$ . Tento krok představuje děj, při kterém jsme otevřeli průtokový kanál mezi komorami. Změna objemu je rovna objemu kapaliny, která přiteče za čas  $\Delta t$  do komory.



Obr. 3.2.2.1: Grafické vyjádření změny tlaku v závislosti na objemu při konstantním zdvihu

Grafické vyjádření je uvedeno na obrázku (3.2.2.2). Můžeme tedy napsat rovnici pro vyjádření změny tlaku:

$$\left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_{x_k, p_k}^{x=\text{konst.}} \cdot \Delta p_{V2} = Q_v \cdot \Delta t \quad (3.2.2.4)$$

Úpravami dostáváme vyjádření  $\Delta p_{V2}$ , což odpovídá změně tlaku při konstantním zdvihu  $x$ .

$$\frac{\Delta p_{V2}}{\Delta t} = \frac{Q_v}{\left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_{x_k, p_k}^{x=\text{konst.}}} \quad (3.2.2.5)$$

Celková změna tlaku v komorách se rovná součtu dílčích změn tlaků. Můžeme tedy napsat rovnici (3.2.2.6) a po dosazení dostáváme (3.2.2.7):

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{\Delta p_{V1}}{\Delta t} + \frac{\Delta p_{V2}}{\Delta t} \quad (3.2.2.6)$$

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = \left( \frac{dp_{V1}}{dx} \right)_{x_k, p_k}^{V=konst.} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{Q_V}{\left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_{x_k, p_k}^{x=konst.}} \quad (3.2.2.7)$$

Díky experimentálně zjištěným charakteristikám průběhu tlaku a objemu můžeme vyjádřit rovnici pro objem v závislosti na zdvihu  $x$  a tlaku  $p$ :

$$V = a + b \cdot x + c \cdot e^{d \cdot x} + g \cdot p + h \cdot x \cdot p \quad (3.2.2.8)$$

Rovnici plochy proložíme experimentálně zjištěnými průběhy optimalizací parametrů rovnice  $a, b, c, d, g, h$ . Následně vyjádříme tlak  $p$ :

$$p = \frac{V - a - b \cdot x - c \cdot e^{d \cdot x}}{g + h \cdot x} \quad (3.2.2.9)$$

Z rovnice pro objem vyjádříme jeho derivaci dle tlaku  $p$ . Dále také z rovnice pro tlak vyjádříme jeho derivaci dle zdvihu:

$$\left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)^{x=konst.} = g + h \cdot x \quad (3.2.2.10)$$

$$\left( \frac{dp}{dx} \right)^{V=konst.} = \frac{(-b - c \cdot d \cdot e^{d \cdot x}) \cdot (g + h \cdot x) - (V - a - b \cdot x - c \cdot e^{d \cdot x}) \cdot h}{(g + h \cdot x)^2} \quad (3.2.2.11)$$

Po indexaci, dle náhradního schématu, tedy tlak v dolní pracovní komoře  $p_1$ , tlak v horní pracovní komoře  $p_3$  a analogicky pro objem  $V_1$  a  $V_3$ , dostáváme rovnice pro popis modelu realizovaného v programovém prostředí MATLAB 6.5.

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta t} = \frac{(-b - c \cdot d \cdot e^{d \cdot x}) \cdot (g + h \cdot x) - (V - a - b \cdot x - c \cdot e^{d \cdot x}) \cdot h}{(g + h \cdot x)^2} \cdot \frac{Q_V}{g + hx} \quad (3.2.2.12)$$

$$\frac{\Delta p_3}{\Delta t} = \frac{(-b - c \cdot d \cdot e^{d(-x)}) \cdot (g + h \cdot (-x)) - (V - a - b \cdot (-x) \cdot c \cdot e^{d(-x)}) \cdot h}{(g + h \cdot (-x))^2} \cdot \frac{-Q_v}{g + h(-x)} \quad (3.2.2.13)$$

$$\frac{\Delta V_1}{\Delta t} = Q_v \quad (3.2.2.14)$$

$$\frac{\Delta V_2}{\Delta t} = -Q_v \quad (3.2.2.15)$$

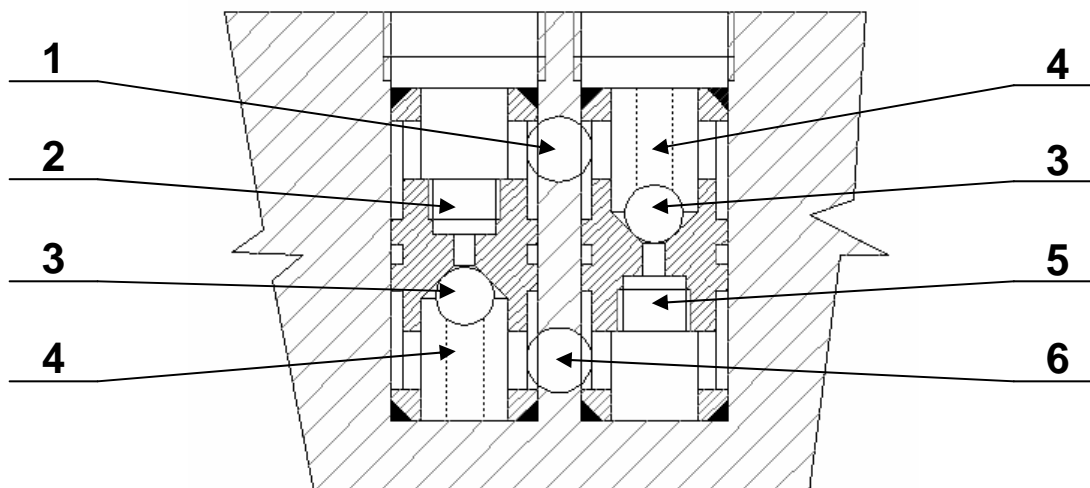
### 3.3 Průtok odporovým vedením

Odporové vedení, které můžeme rozdělit na průtok tryskou s konstantním průřezem  $Q_T$  a průtok servoventilem  $Q_S$ , který tvoří řiditelnou část průtoku, charakterizujeme průtokovými rovnicemi, vyjádřenými z Bernoulliho rovnice, viz [6], [1]. Výsledný průtok odporovým vedením je dán součtem dílčích průtoků.

$$Q_v = Q_T + Q_S \quad (3.3.1)$$

#### 3.3.1 Průtok kapaliny tryskou

Vedení mezi horní a dolní pracovní komorou je realizováno pomocí dvou kuličkových ventilů, do kterých je možno umístit trysku s konstantním průřezem, popsáno v [4]. Realizace je uvedena na obrázku (3.4.1.1). Použitím různých trysek lze nastavit základní charakteristiku tlumiče. Uspořádání kuličkových ventilů je přizpůsobeno tak, aby při  $p_1 < p_3$  propouštěla tryska s plochou průřezu  $S_{31}$  ve směru z horního vlnovce s tlakem  $p_3$  do spodního vlnovce s tlakem  $p_1$ . Při opačném poměru tlaků, tedy  $p_1 > p_3$ , dochází k průtoku opačným směrem přes trysku s plochou průřezu  $S_{13}$ .



*Obr. 3.4.1.1: Realizace odporového vedení tryskou*

1. Průtokový kanál propojený s horní pracovní komorou
2. Průtoková tryska z horní do dolní pracovní komory s plochou průtoku  $S_{31}$
3. Kulička zabraňující při rovnováze tlaků průtoku tryskou
4. Přítlačná pružinka kuličky
5. Průtoková tryska z dolní do horní pracovní komory s plochou průtoku  $S_{31}$
6. Průtokový kanál propojený s dolní pracovní komorou

Popis průtoku oleje tryskami je uveden v modelu [4]. Z důvodu hledání možných nepřesností byl tento popis proveden znovu a je uveden níže. Byla provedena jak kontrola matematického popisu, tak jeho realizace v prostředí MATLAB kapitola 5.

Vyjdeme z Bernoulliho rovnice popsané v [5]. Každý člen rovnice představuje jednotlivé energie kapaliny. Součet všech energií, tj. kinetické, reprezentované prvním členem rovnice, tlakové, reprezentované druhým členem rovnice, a polohové, je celková mechanická energie kapaliny. Bernoulliho rovnice vyjadřuje zákon zachování energie při proudění dokonalé kapaliny za působení tíhového zrychlení.

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + h = konst \quad (3.4.1.1)$$

Po úpravě vztahu a označení veličin indexem 1 na přítoku a indexem 2 na výtoku dostáváme vyjádření Bernoulliho rovnice ve tvaru popsaného v [5]:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gh_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gh_2 \quad (3.4.1.2)$$

Využijeme zákonu zachování hmotnosti při proudění tryskou, kde  $S_1$  reprezentuje průtokovou plochu na vstupu a  $S_2$  plochu průtoku na výstupu,  $\rho$  je hustota oleje. Poté  $v_1$  je rychlost proudění na vstupu a  $v_2$  odpovídá rychlosti výtoku.

$$Q_m = \rho_1 \cdot S_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot S_2 \cdot v_2 = konst \quad (3.4.1.3)$$

Jako kapalina byl použit silikonový olej, jehož součinitel stlačitelnosti je převratná hodnota modulu objemové pružnosti oleje  $K$ . Stlačitelnost oleje je tedy malá a změna hustoty oleje je zanedbatelná. Dostáváme zjednodušený tvar pro hmotnostní tok a z něho vyjádříme vztah pro určení rychlosti  $v_1$ :

$$v_1 = \frac{S_2 \cdot v_2}{S_1} \quad (3.4.1.4)$$

Dosazením (3.4.1.4) do (3.4.1.2) a vyjádřením rychlosti výtoku  $v_2$  dostáváme vztah:

$$v_2 = \sqrt{\frac{S_1^2}{S_1^2 - S_2^2} \cdot \left[ \frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_2) + 2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2) \right]} \quad (3.4.1.5)$$

Vliv polohové energie kapaliny z hlediska tlakové energie můžeme zanedbat, protože tlaková energie je vyšší. Rychlost průtoku bude ovlivňovat pouze rozdíl tlaků v pracovních komorách hydraulického systému.

Předpokládáme-li, že výtokový otvor trysky bude k průřezu přítoku malý  $S_1 \gg S_2$ , bude rychlost kapaliny  $v_1$  vůči rychlosti  $v_2$  zanedbatelná [5].

$$v_2 = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_2)} \quad (3.4.1.6)$$

Vztah (3.4.1.6) je odvozen z Bernoulliho rovnice pro proudění dokonalé kapaliny. U skutečné kapaliny se vyskytují třecí síly, které jsou způsobeny viskozitou [5]. Zavedeme ztrátový součinitel  $\alpha$  pro zavedení těchto třecích sil a dostáváme vyjádření rychlosti na výtoku pro skutečnou kapalinu.

$$v_2 = \alpha \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_2)} \quad (3.4.1.7)$$

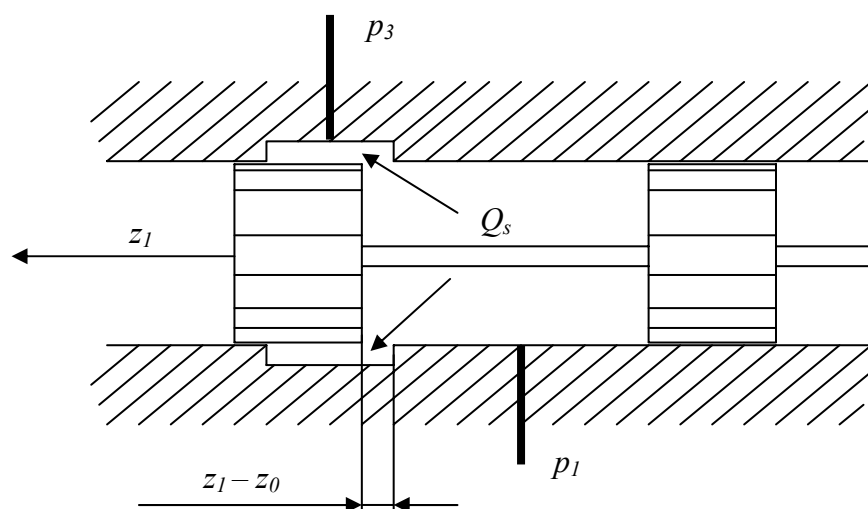
Označíme-li průtokovou plochu trysky propouštějící při  $p_3 > p_1$  jako  $S_{31}$  a trysku při opačném poměru jako  $S_{13}$ , dostáváme po dosazení rovnice pro průtok tryskami:

$$Q_T = S_{13} \cdot \alpha_{13} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_3)} \quad \text{pro } p_1 > p_3 \quad (3.4.1.8)$$

$$Q_T = S_{31} \cdot \alpha_{31} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_3 - p_1)} \quad \text{pro } p_3 > p_1 \quad (3.4.1.9)$$

### 3.3.2 Průtok kapaliny servoventilem

V popisu průtoku servoventilem byly odhaleny chyby jak ve vyjádření, tak v samotné realizaci v prostředí MATLAB 5.3. Je zde uveden opravený matematický popis, který vychází z [1] a již sestaveného modelu [4]. Servoventil umožňuje plynulou změnu průtoku v závislosti na řídicím signálu. Regulace průtoku je realizována pomocí proměnných hydraulických odporů na hraně šoupátka ventilu (obr. 3.3.2.1), popsané v [1].



Obr. 3.3.2.1: Realizace servoventilu

Pro stanovení rychlosti proudění kapaliny za ventilem vyjdeme ze vztahu pro rychlost průtoku za tryskou (3.4.1.6), popsaného v kapitole 3.4.1 a vyjádřeného z Bernoulliho rovnice. Po dosazení pro poměr tlaku  $p_1 > p_3$  dostáváme:

$$v_{13S} = \alpha_S \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_3)}, \quad (3.4.2.1)$$

kde  $v_{13S}$  vyjadřuje rychlost proudění za servoventilem při průtoku kapaliny z dolního dvojvlnovce do horního a  $\alpha_S$  je ztrátový součinitel průtoku servoventilem. Rovnice pro  $v_{31S}$  při poměru tlaků  $p_1 < p_3$ , tedy při opačném proudění, se rovná:

$$v_{31S} = -\alpha_S \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_3 - p_1)} \quad (3.4.2.2)$$

Z rovnic (3.4.2.1) a (3.4.2.2) je patrné, že můžeme vyjádřit rychlost výtoku ze servoventilu v závislosti na tlakovém spádu se znaménkovým určením směru proudění v závislosti na poměru tlaků  $p_3$  a  $p_1$ .

$$v_S = \alpha_S \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |p_1 - p_3|} \cdot \text{sign}(p_1 - p_3) \quad (3.4.2.3)$$

Pro vyjádření objemového průtoku servoventilem využijeme rovnice pro objemový průtok, kde průtočná plocha  $S_S$  bude pro servoventil rovna plášti válce daného průměrem šoupátka  $d_S$  a výškou válce danou velikostí otevření servoventilu  $z_1 - z_0$ .

$$Q_S = S_S \cdot v_S \quad (3.4.2.4)$$

$$S_S = \pi \cdot d_S \cdot (z_1 - z_0) \quad (3.4.2.5)$$

Po dosazení (3.4.2.3) do (3.4.2.4) dostáváme:

$$Q_S = S_S \cdot \alpha_S \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |p_1 - p_3|} \cdot \text{sign}(p_1 - p_3) \quad (3.4.2.6)$$

Dynamické vlastnosti ventilu lze modelovat pomocí diferenciální rovnice 2. řádu popsané v [1].

$$T_{sv}^2 \ddot{z}_1 + 2\xi_{sv} T_{sv} \dot{z}_1 + z_1 = K_{sv} u_{sv} \quad (3.4.2.7)$$

$K_{sv}$  reprezentuje zesílení servoventilu,  $u_{sv}$  řídicí napětí,  $T_{sv}$  časovou konstantu,  $z_1$  relativní polohu šoupátka a  $\xi_{sv}$  tlumicí konstantu servoventilu.



## 4 Měření

V matematickém modelu [4] vypracovaném v roce 2003 bylo použito pro vyjádření charakteristické závislosti efektivní plochy na zdvihu aproximace lineární funkce. Tato závislost nebyla proměřena, ale její vliv na model je značný. Po konzultacích v hydrodynamické laboratoři bylo navrženo měření pro stanovení této charakteristiky pro vlnovce použité v hydraulickém obvodu. V hydraulické části pružicí a tlumicí jednotky jsou umístěny v sérii čtyři třívlonné vlnovce značky DUNLOP s označením 3 x 2  $\frac{3}{4}$  (obr 4.1). Sestavená pružicí a tlumicí jednotka byla uchována zkompletovaná a pro stanovení charakteristik byl použit jeden vlnovec stejného typu, který byl umístěn do měřicího zařízení zkonstruovaného pro měření silových a tlakových účinků [3].



*Obr. 4.1: Vlnovec typu DUNLOP 3 x 2  $\frac{3}{4}$*

U třívlnného vlnovce použitého pro měření charakteristik předpokládáme malý časový odstup od výroby vůči vlnovcům použitým v jednotce. Z tohoto předpokladu

vyplývá, že vlnovce použité pro měření a v jednotce se shodují. Měřicí systém byl původně určen pro měření silových a tlakových účinků při osovém, ale i mimosovém zatěžování. V našem případě jsme přizpůsobili měření pouze pro osové zatěžování. Z naměřených silových a tlakových účinků lze sestavit charakteristiku závislosti efektivní plochy vlnovce na zdvihu, viz kapitola 3.2.1. Dále bylo doplněno experimentální měření objemu vlnovce, a tedy stanovení závislosti objemu na zdvihu a tlaku. Tato závislost při prvním měření nebyla proměřena. Chyba použitých tenzometrů byla větší než změny objemu v odměrném válci. Tenzometry na válci byly vyměněny a bylo provedeno doplňující měření objemu.

## 4.1 Popis měřicí soustavy

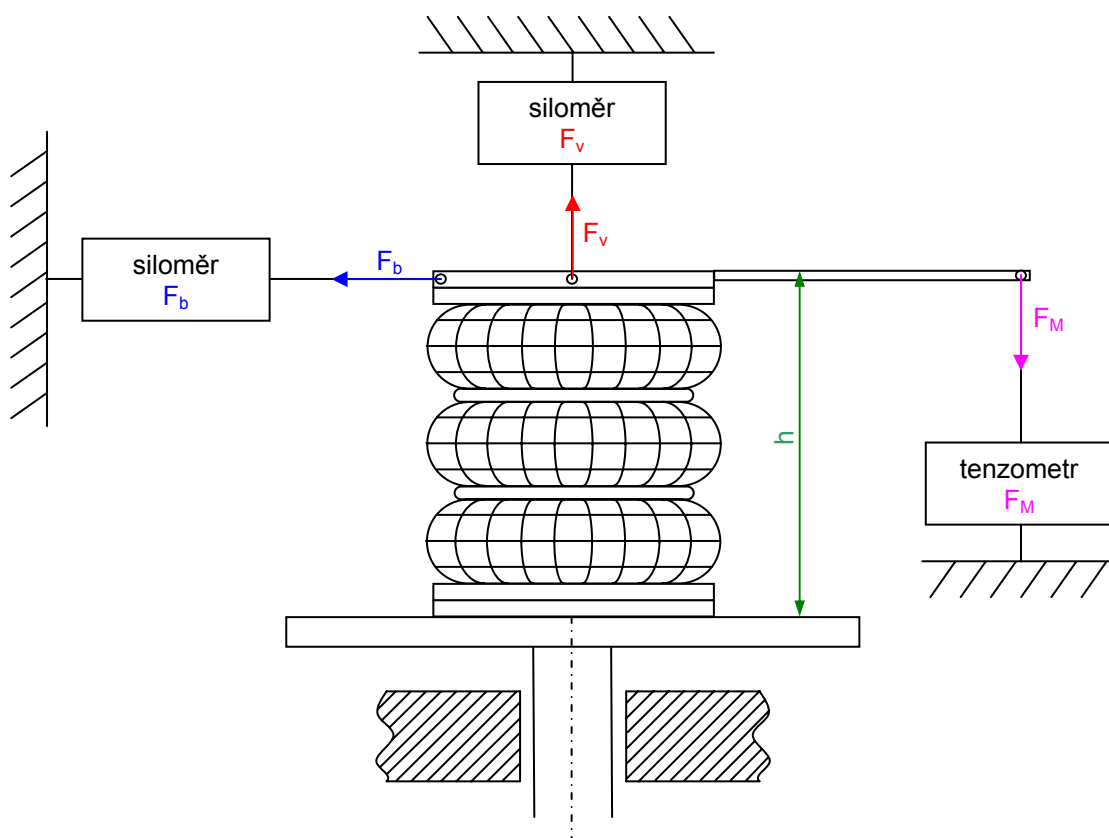
Měřicí soustava byla navržena pro měření silových a tlakových účinků vlnovcových pružin. Také umožňuje stanovení průběhu objemu v závislosti na zdvihu při různém natlakování.

Základem měřicího zařízení je robustní rám se svislým vedením. Ve spodní části rámu je umístěn hydropulzní válec, který zajišťuje přenos budicího signálu na spodní čelo měřeného vlnovce. V horní části rámu je umístěn snímač osových silových účinků snímající osovou sílu  $F_v$ . Horní čelo vlnovce je spojeno s tímto snímačem přes valivé ložisko, což zajišťuje snímání pouze osových sil. K hornímu čelu vlnovce je ve vodorovném směru také přes valivé ložisko připojen snímač bočních silových účinků  $F_B$ . Tento snímač zde byl umístěn pro potřeby měření popsáno v [3]. V našem případě byl snímač odpojen. Na druhé straně je horní čelo spojeno vodorovným ramenem s tenzometrickým snímačem pro snímání momentové síly  $F_M$ . Určené momentové síly  $F_M$  v našem měření využijeme pouze pro kalibraci. Výsledná osová síla je dána vztahem:

$$F_o = F_v - F_M \quad (4.1)$$

Protože při měření provádíme zatěžování pouze v osovém směru a nedochází k vyosení, rovná se síla  $F_M$  nule. Po dosazení do vztahu (4.1.) dostáváme vyjádření síly  $F_o$  při měření pouze osových účinků:

$$F_o = F_v \quad (4.2)$$

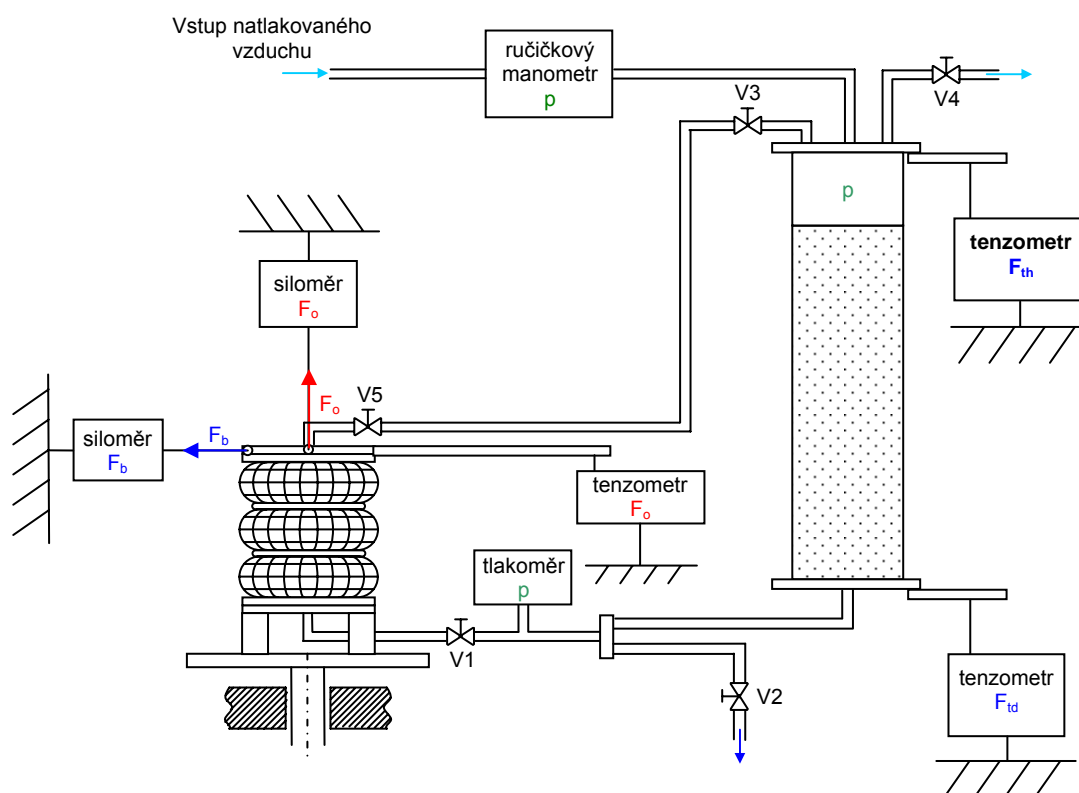


Změna objemu pružiny je staticky, případně kvazistaticky měřena vážením objemu kapaliny pomocí tenzometrů. Tenzometry jsou umístěny na horním a spodním čele odměrného válce (fotografie viz příloha II.A, II.B) a tvoří úplný tenzometrický můstek. Měření objemu je zkonstruováno na principu spojitých nádob, kdy vlnovec je spojen s odměrným válcem rozvodnou umělohmotnou hadicí. V závislosti na roztažení nebo stlačení vlnovce se mění objem tekutiny v něm, a tedy i odměrném válci. Tenzometry je válec vážen a hmotnost převedena na objem.

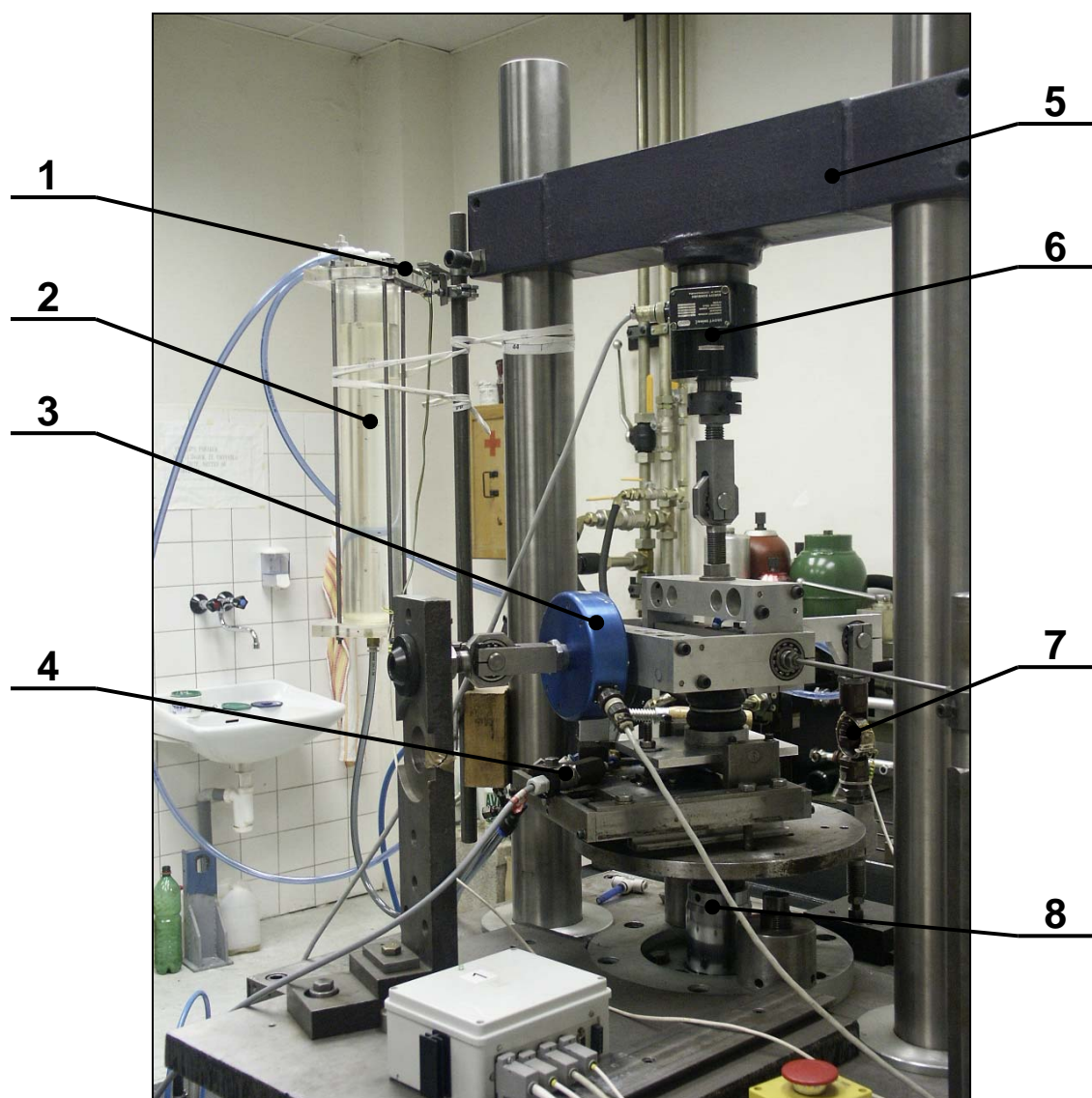
Jako pracovního média bylo použito vody. Za předpokladu nestlačitelnosti média a dokonalé tuhosti rozvodných umělohmotných hadic je experimentálně změřený objem roven reálnému objemu vlnovce v závislosti na zdvihu a tlaku. V odměrném válci je nad hladinou vytvořen vzduchový polštář. Pomocí přívodu tlakového vzduchu ze zásobníku stlačeného vzduchu umístěného poblíž nastavujeme tlak  $p$  v celém měřicím systému.

Tlak nastavujeme dle pomocného ručičkového manometru umístěného na přívodu. Paralelně kontrolujeme tlak na elektrickém čidle tlaku umístěného na spojovacím vedení mezi vlnovcem a odměrným válcem.

Snímané hodnoty na jednotlivých snímačích jsou převedeny na napěťové hodnoty a ty jsou upraveny zesilovačem. Upravené hodnoty jsou předány do řídicího počítače, kde dochází k jejich dalšímu zpracování. V celkovém schématu jsou označeny tlakové ventily  $V1$  až  $V6$ . Ventilem  $V6$  nastavujeme natlakování měřicího systému. Ventily  $V1$ ,  $V3$ ,  $V5$  jsou pracovní a využije se jich při měřicím postupu. Ventilem  $V4$  se vypouští natlakovaný vzduch a  $V2$  plní funkci vypouštěcího ventilu pro vodu. Zdvih je zaznamenáván z budicího signálu pro hydropulzní válec.



Obr. 4.3: Celkové schéma měřicího systému



*Obr. 4.4: Fotografie celého měřicího zařízení*

1. Tenzometr na odměrném válci pro vážení objemu
2. Válec pro měření objemu vlnovce
3. Snímač bočních silových účinků
4. Snímač tlaku
5. Robustní rám se svislým vedením
6. Snímač osových silových účinků
7. Tenzometrické snímání momentu
8. Hydraulický pulsátor

## 4.2 Snímače a vlastní měření

Měření byla provedena, jak už bylo zmíněno, na třívlonné vlnovcové pružině DUNLOP 3 x 2  $\frac{3}{4}$ . Měření vycházela ze zástavbové výšky  $h_0 = 113 \text{ mm}$ , kterou jsme stanovili jako průměr z rozdílu maximální a minimální pracovní délky. Maximální protažení vlnovce  $h_{\max}$ , uvedené v katalogu příloha I.A, je 145 mm a je zachyceno na fotografii, viz příloha II.C. Minimální katalogová délka  $h_{\min}$  je stanovena na 80 mm. Je stanovena tak, aby nedocházelo ke kontaktu uvnitř vlnovce mezi sousedícími vlnami. Před měřením jsme i tento katalogový údaj ověřili experimentálně, viz foto příloha II.D. Zdvih  $x$  byl při měření měněn v rozsahu  $\pm 30 \text{ mm}$  a při doplňujícím měření byl tento zdvih měněn v rozsahu  $\pm 32 \text{ mm}$ .

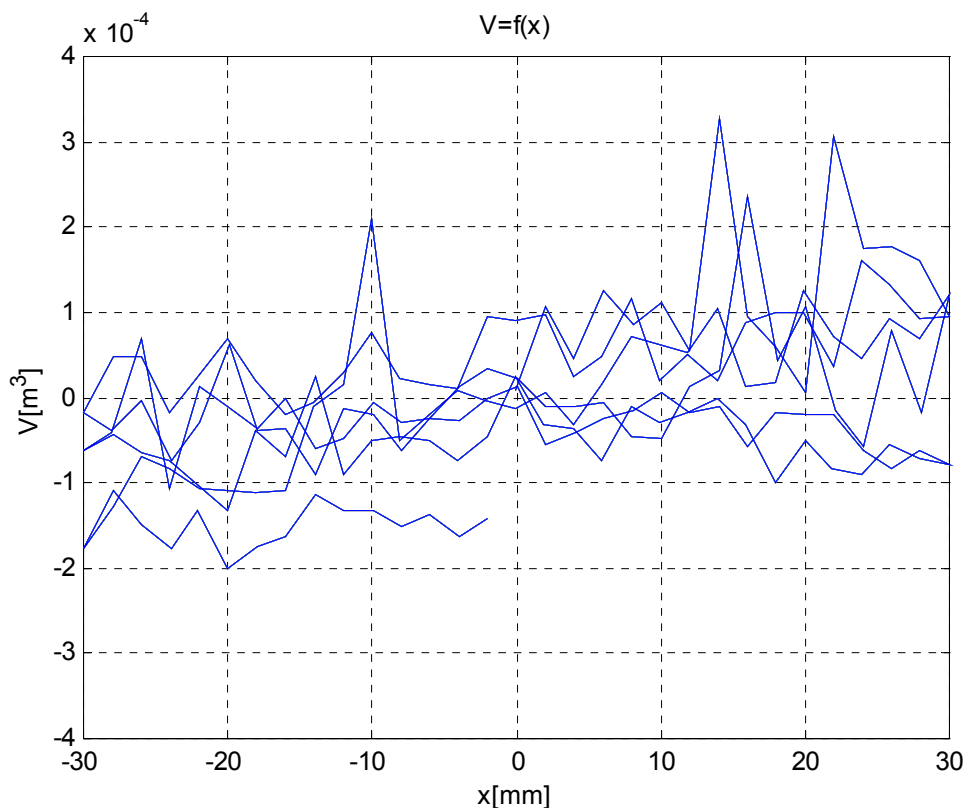
Pracovní tlak vlnovce je dán katalogem v rozmezí 0,1 – 0,7 MPa při zástavbové délce 119 mm. My jsme měření prováděli v rozmezí 0,2 až 0,65 MPa. Pro dobré stanovení charakteristik by bylo potřebné provést měření v celém rozsahu povolených tlaků, ale z důvodu použitého tlakoměru bylo možné měřit jen v uvedeném rozsahu. Použití jiného tlakoměru se bohužel nepovedlo docílit z časových důvodů. Měření nepřekročila katalogové hodnoty jak pro zdvih, tak pro tlaky, a nemohlo tak dojít k nevratnému poškození vlnovce nebo ovlivnění měření překračováním konstrukčních parametrů vlnovce.

Pro snímání tlaku byl použit tlakový snímač DMP 31 s jmenovitým rozsahem 1 MPa. Byl zesílen zesilovačem konstantou 1 a odeslán do řídicího počítače, kde byla hodnota napětí převedena na reálnou hodnotu tlaku dle kalibrace. Kalibrační křivka, viz příloha II.E.

Snímání osově síly zajišťoval snímač FS 20 s rozsahem 20 kN. Napětí bylo stejně jako u tlaku zpracováno řídicím počítačem a převedeno do jednotek kN dle kalibrační křivky, která byla sestavena již při minulém měření a nebylo třeba ji sestavovat.

Pro měření objemu bylo využito odměrného válce, který byl vážen tenzometry. Měření bylo zapojeno jako úplný tenzometrický můstek. Výstupní napětí z tenzometrů bylo zesíleno konstantou 250, zpracováno a převedeno dle kalibrace do objemu. Objem vlnovce v zástavbové výšce  $h_0$  je  $1.7795 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  a změna objemu nepřevyšuje  $1.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ . Chyba měření objemu tenzometry při prvním měření byla větší než maximální změna objemu. Výstupem z tenzometrů byl pouze šum. V grafu

na (obr. 4.2.1) je vykreslena změna objemu od konstantního objemu při zástavbové výšce  $h_0 = 113 \text{ mm}$ , závislá na změně zdvihu  $x$  při prvním měření.



Obr. 4.2.1: Graf závislosti exp. změřených změn objemu  $V[m^3]$  na zdvihu  $x[mm]$  při tlaku  $0,4 \text{ MPa}$

Jak je patrné z grafu, možnost experimentálně změřeného objemu byla znemožněna snímači. Po nainstalování nových tenzometrických čidel bylo provedeno doplňující měření objemu, jehož výsledky jsou podrobně popsány v kapitole 4.3. Natlakování bylo nastavováno za pomoci kontrolního manometru Plema o rozsahu  $1 \text{ MPa}$  a kontrolováno dle tlakoměru DMP 31.

Na začátku měření jsme provedli kalibraci tenzometrů pro měření objemu a tlakového snímače DMP 31. Vlnovec byl za pomoci hydropulzního válce uveden do zástavbové výšky  $h_0$  a natlakován na tlak  $0,4 \text{ MPa}$ . Byly uzavřeny ventily V1 a V5. Tím byl tlak ve vlnovci uzavřen. Ve zbytku systému byl tlak vynulován a do odměrného válce byla nalita voda. Odměřili jsme výšku hladiny a natlakovali na  $0,4 \text{ MPa}$ . Poté byl otevřen ventil V1 a ventilem V5 byl pod tlakem napuštěn vlnovec. Znovu byla změřena

výška hladiny v odměrném válci po napuštění vlnovce. Rozdílem hladin a použitím vzorce pro výpočet objemu válce je stanoven objem válce při tlaku 0,4 MPa.

$$V = h_v \cdot \pi \cdot r^2 \quad (4.2.1)$$

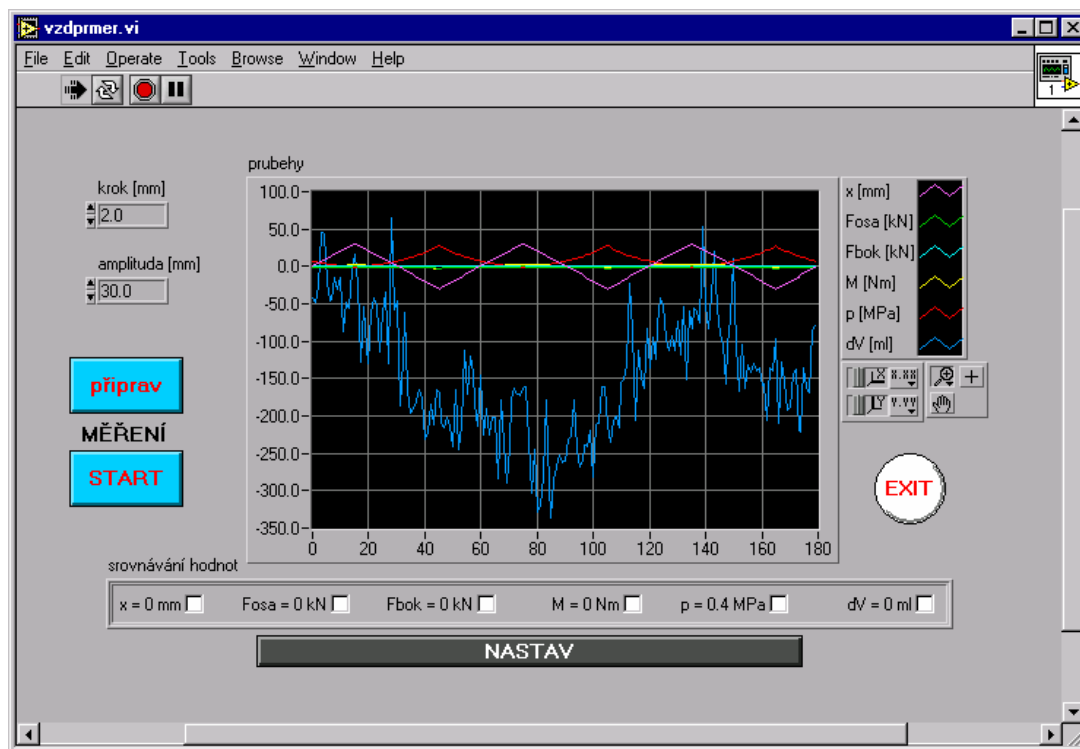
Po dosazení do vzorce (4.2.1), kde  $h_v = 48$  mm je rozdíl hladin před a po naplnění vlnovce vodou z odměrného válce o poloměru  $r = 34$  mm, dostáváme výsledný exp. zjištěný objem  $V_0$  vlnovce při zástavbové výšce  $h_0$  a tlaku 0,4 MPa. Ten je roven  $1.7795 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ . Poté byl opět uzavřen ventil V1 na spojovacím vedení mezi válcem a vlnovcem, aby nedošlo k ztrátě tlaku ve vlnovci. Tím by došlo k zmenšení objemu a vrácení tekutiny zpět do válce. Následně jsme dolili do válce vodu do výšky  $h_v$ , ovšem od horní hrany odměrného válce. Tím docílíme co největší možné hmotnosti válce a zachování prostoru pro stoupání hladiny při stačování. Dále také objem vzduchového polštáře nad hladinou odpovídá objemu vlnovce. Nemůže tedy dojít k přetečení válce. Dále jsme otevřeli ventil V1, oddělující válec od vlnovce, a pomocí kontrolního manometru byl nastaven tlak ve vzduchovém polštáři nad hladinou, a tedy i v celém měřicím systému. Poté jsme mohli začít s samotným měřicím cyklem.

Při prvním měření bylo prováděno kvazistatické měření. Každé měření začínalo v zástavbové výšce  $h_0$  a při různých natlakováních v rozmezí 0,2 až 0,5 MPa po kroku 0,05 MPa. Bylo tedy naměřeno sedm sad měření. Při měření byl zdvih realizován po krocích. Zdvih byl změněn o 2 mm. Po dobu 5 s dochází k ustálení systému, především k zastavení pohybu tekutiny v hadicích a v odměrném válci. V další sekundě je sejmuto z každého snímače 250 hodnot. Tyto hodnoty jsou zprůměrnovány a výsledná hodnota je uložena do výstupního souboru. Teplota systému byla ustálena na stejnou teplotu v místnosti. Změny v průběhu měření byly zanedbatelné díky rozsahu měření, které nepřesahovalo katalogové hodnoty, a nedocházelo tak k namáhání materiálu, a tedy k zahřívání. I samotný měřicí proces je pomalý, a nedochází tedy ani k ohřevu díky proudění tekutiny.

Celý měřicí systém byl ovládán programem připraveným v laboratoři pro toto měření. Do programu byly zadány kalibrace snímačů a dále byla nastavena nula siloměru osové síly, tedy byly vynulovány silové účinky měřicí soustavy. Po provedení postupu uvedeného výše s naplněním vlnovce byl systém natlakován na 0,4 MPa. Při tomto tlaku byl nastaven offset tlakoměru. Při měření docházelo k mírnému posuvu offsetu, který byl eliminován programově. Poté byl spuštěn měřicí cyklus, který provedl



tři cykly zdvihu v námi zvoleném rozsahu  $\pm 30$  mm. Ukázka okna měřicího prostředí je uvedena na (obr. 4.2.2). Při každém měření pro různé tlaky byl proveden stejný cyklus. Naměřených 180 hodnot pro každou veličinu bylo uloženo do sloupců matice.



Obr. 4.2.2: Podoba výstupního souboru

Při doplňujícím měření pro zjištění objemu bylo využito měřicího programu, upraveného pro potřeby měření. Program zobrazoval aktuální hodnoty změn objemu  $dV$ . Pomocí hydropulzního válce byl vlnovec uváděn do požadovaných hodnot zdvihu a po ustálení byly odečítány hodnoty změn objemu. Výsledky tohoto měření jsou popsány v následující kapitole. Toto měření bylo provedeno v rozsahu  $\pm 32$  mm. Rozsah tlaků při měření byl 0,35 MPa až 0,65 MPa, kde spodní omezení je zapříčiněno citlivostí měřicího zařízení. Při tlaku 0,35 MPa byly změny objemu menší, než byla citlivost měření. Maximální hodnota tlaku byla dána rozsahem tlakoměru.

Podoba výsledné matice je naznačena na (obr. 4.2.3). Je zde znázorněno uspořádání výstupního souboru u prvního měření. Matice hodnot byla uložena do souborů s unifikovanou podobou názvu. Bylo tak dosaženo rozlišitelnosti souborů dle natlakování a zdvihu, při kterém byla pružina měřena. Struktura názvu souboru je naznačena na obrázku (4.2.4).

```

%měřeno...zdvih [mm]...síla osa [kN]...síla bok [kN]...moment [Nm]...tlak [MPa]...objem [ml]
%
0.017 -0.455 0.004 0.044 -21.181 -25.394
2.084 -0.418 0.004 0.118 -21.648 -35.913
4.065 -0.387 0.005 0.205 -22.039 -41.184
6.112 -0.357 0.005 0.183 -22.413 -79.205
8.104 -0.329 0.005 0.373 -22.762 -57.091
10.088 -0.303 0.005 0.346 -23.087 -95.088
12.077 -0.275 0.004 0.270 -23.394 -85.156
14.067 -0.248 0.004 0.338 -23.695 -104.576
16.099 -0.222 0.004 0.288 -23.986 -36.217
18.096 -0.196 0.004 0.517 -24.243 -152.483
20.110 -0.169 0.004 0.528 -24.471 -97.033
.      .      .      .      .      .
.      .      .      .      .      .
.      .      .      .      .      .

```

Obr. 4.2.3: Podoba výstupního souboru

**3vlna A30 P025 .zdt**

parametr pro zdvih

parametr pro tlak

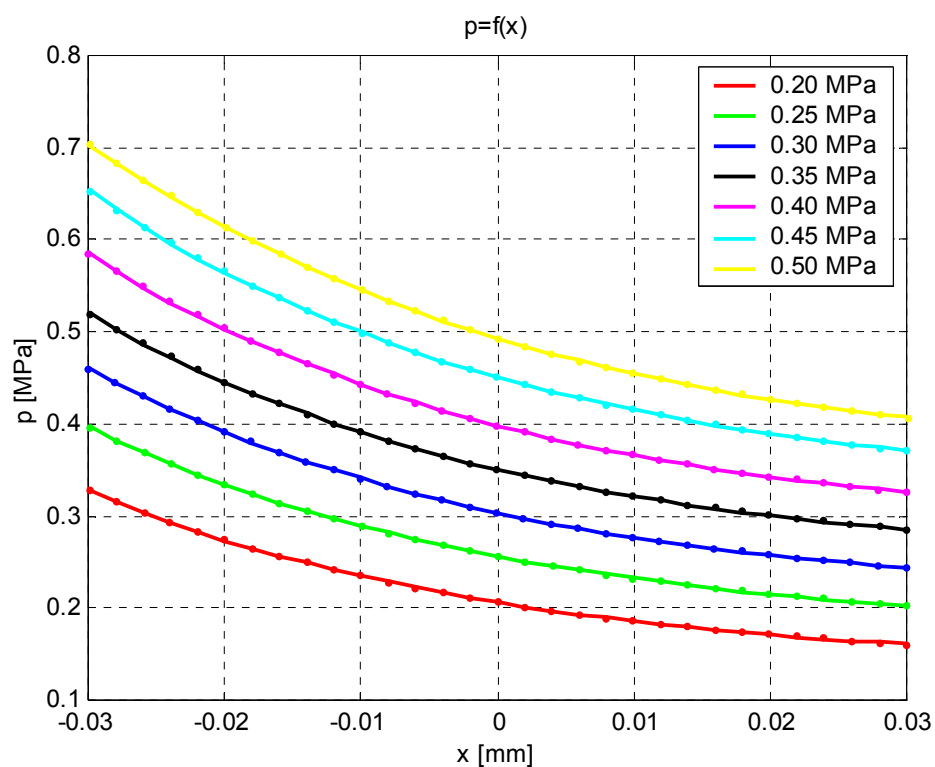
Obr. 4.2.4: Název výstupního souboru pro tlak 0,25 MPa a zdvih  $\pm 30$  mm

Při doplňujícím měření jsem provedl odečítání výšky vodního sloupce v odměrném válci a tím jsem získal řadu hodnot pro vypočtení objemu ze vzorce (4.2.1). Získal jsem tak kontrolní křivku k vypočteným objemům. Provedl jsem tak částečnou kontrolu naměřeného objemu. Výsledky této kontroly jsou uvedeny v následující kapitole Zpracování naměřených hodnot.

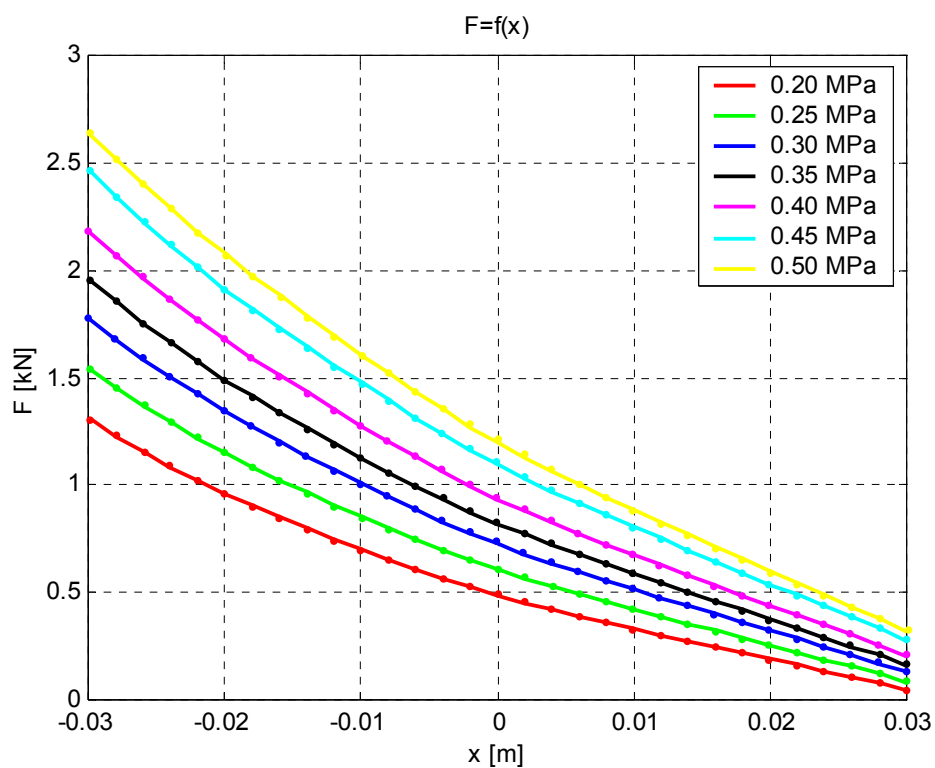
### 4.3 Zpracování naměřených hodnot

Zpracování hodnot bylo provedeno v programovém prostředí MATLAB 6.5. Výstupní soubory z měření byly nahrány a vykresleny do grafů níže uvedených. Dále jsou v grafech uvedena proložení měření regresními křivkami různých řádů. Efektivní plocha vlnovce byla vypočtena na základě výše uvedených vzorců z poměru tlakových a silových účinků. Všechny proměnné byly upraveny do společných jednotek.

Na obrázku (4.3.1) je vykreslen průběh tlaků uvnitř vlnovce a dále obrázek (4.3.2) zobrazuje průběh silových účinků. Obě tyto veličiny jsou v závislosti na zdvihu a počátečním natlakování a jsou proloženy polynomičnou funkcí. Tyto průběhy byly zjištěny při prvním měření na vlnovci.



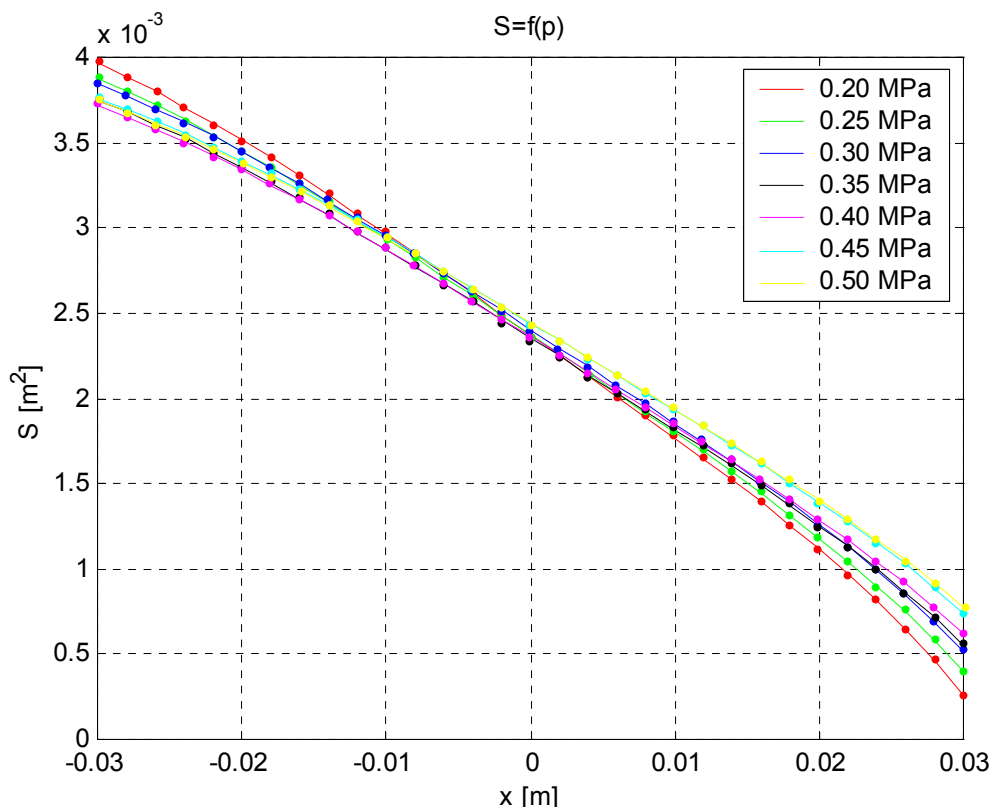
Obr. 4.3.1: Graf vývoje tlaků uvnitř vlnovce v závislosti na zdvihu  $x$  při různých natlakováních v zástavbové výšce  $h_0$



Obr. 4.3.2: Graf silových účinků vlnovce v závislosti na zdvihu  $x$  při různých natlakováních v zástavbové výšce  $h_0$

Z grafu na obr. 4.3.1 je patrné, že měření průběhů tlaků je přijatelné a odpovídá předpokladu. Při doplňujícím měření objemu byl znovu snímán tlak. Provedl jsem kontrolu a porovnání výsledků z obou měření. Tato měření si odpovídají. Na dalším obrázku je graf pro silové účinky. U těchto průběhů byla také provedena kontrola. V příloze II.G a II.H jsou uvedeny průběhy tlakových a silových účinků v závislosti na čase  $t$ .

Následující graf na obr. 4.3.3 zobrazuje vypočtenou efektivní plochu.



Obr. 4.3.3: Graf efektivní plochy a její regrese pro různé natlakování při zástavbové výšce  $h_0$

V tabulce 4.3.1 jsou uvedeny regresní polynomy křivek, které jsou proloženy vypočtenými hodnotami efektivní plochy. Byl použit polynom 5. stupně a jeho tvar je uveden zde:

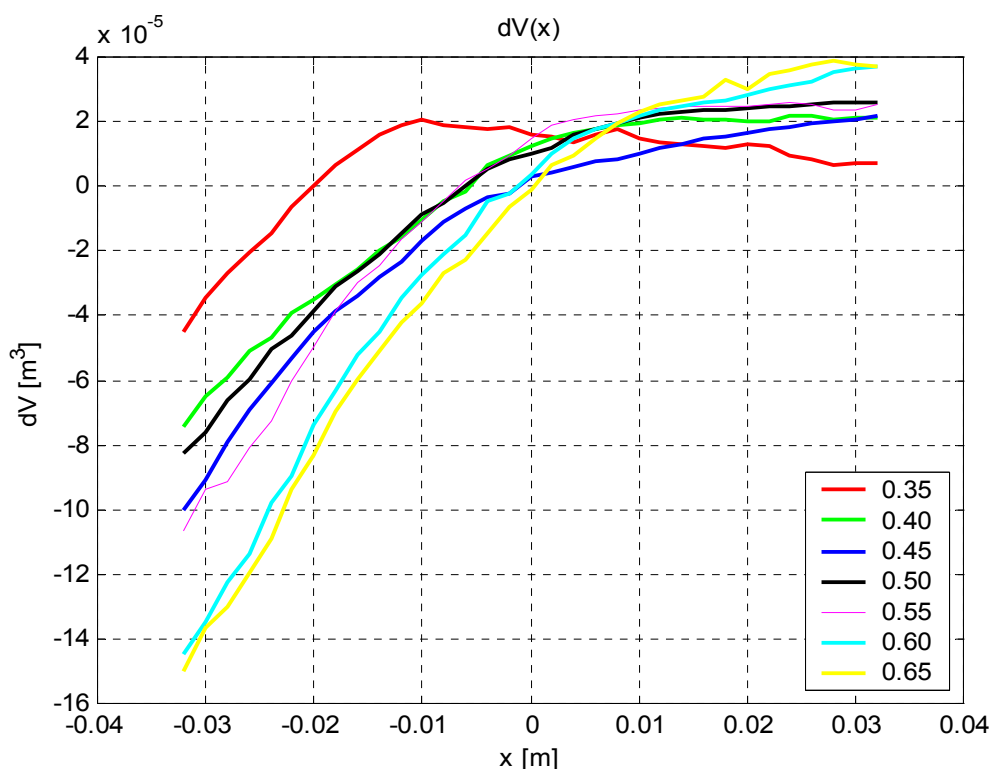
$$S(x) = a_5 \cdot x^5 + a_4 \cdot x^4 + a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 \quad (4.3.1)$$

Tato regrese byla použita pro model A. V modelu B bylo použito proložení plochou. Toto proložení je uvedeno v kapitole 5.2.

tlak při výšce $h_0$	$a_5$	$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_0$
0,20 MPa	$-4.445 \cdot 10^3$	$-2.907 \cdot 10^2$	-2.057	$-2.047 \cdot 10^{-2}$	$-6.011 \cdot 10^{-2}$	$-2.371 \cdot 10^{-3}$
0,25 MPa	$-2.735 \cdot 10^3$	$-2.503 \cdot 10^2$	-1.031	$-3.556 \cdot 10^{-2}$	$-5.665 \cdot 10^{-2}$	$-2.372 \cdot 10^{-3}$
0,30 MPa	$-2.958 \cdot 10^3$	$-2.303 \cdot 10^2$	-2.270	$-4.319 \cdot 10^{-2}$	$-5.509 \cdot 10^{-2}$	$-2.408 \cdot 10^{-3}$
0,35 MPa	$-2.846 \cdot 10^3$	$-2.035 \cdot 10^2$	-2.468	$-3.598 \cdot 10^{-2}$	$-5.312 \cdot 10^{-2}$	$-2.352 \cdot 10^{-3}$
0,40 MPa	$-2.946 \cdot 10^3$	$-1.874 \cdot 10^2$	-3.015	$-4.344 \cdot 10^{-2}$	$-5.205 \cdot 10^{-2}$	$-2.362 \cdot 10^{-3}$
0,45 MPa	$-3.661 \cdot 10^3$	$-1.836 \cdot 10^2$	-4.267	$-4.869 \cdot 10^{-2}$	$-5.127 \cdot 10^{-2}$	$-2.443 \cdot 10^{-3}$
0,50 MPa	$-3.766 \cdot 10^3$	$-1.660 \cdot 10^2$	-4.498	$-5.623 \cdot 10^{-2}$	$-5.064 \cdot 10^{-2}$	$-2.444 \cdot 10^{-3}$

Tab. 4.3.1 : Tabulka regresních polynomů pro efektivní plochu

Další měřenou veličinou je objem. První měření díky použitým tenzometrickým snímačům nebylo provedeno. V doplňujícím měření po přelepení tenzometrů. Toto měření proběhlo. Bohužel bylo opět poznamenáno nepřesnostmi a samotným měřením. Dalším aspektem byly i časové podmínky pro měření. Byly změřeny změny objemu  $dV$ , ale změřené změny objemu v zástavbové výšce  $h_0$  nelze považovat za pravdivé, protože naměřené hodnoty převyšovaly dvojnásobně vlastní objem vlnovce, což je z fyzikálních vlastností vlnovce nemožné, a nebylo ani pozorováno takové roztažení vlnovce, které by odpovídalo zdvojnásobení objemu. To lze samozřejmě odpozorovat i z fotografií v příloze. Zde je vlnovec zachycen v zástavbové a maximální výšce. Jsou to přílohy II.D, II.C.

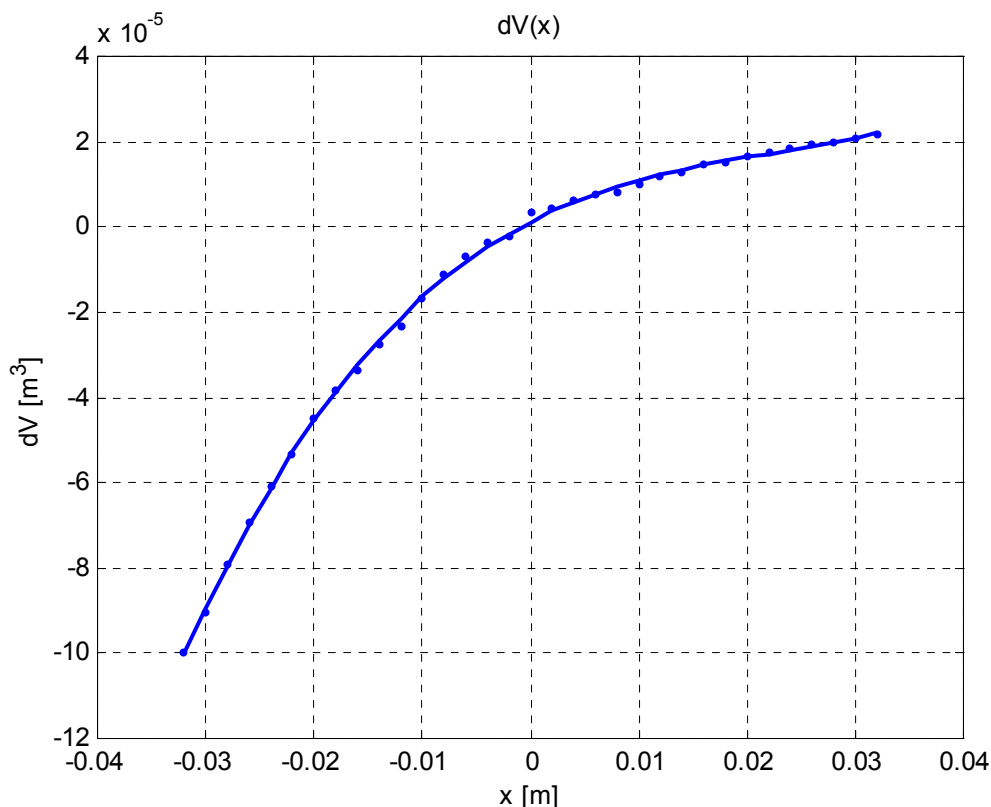


Obr. 4.3.4: Graf experimentálně zjištěných změn objemu

Z grafu na obrázku 4.3.4 je patrné již několik nesrovnalostí. V prvním případě je to chování při měření pro tlak 0,35 MPa. Při tomto tlaku jsou již změny objemu tak malé, že zasahují do citlivostního pásma tenzometrů, a proto toto měření nelze považovat za použitelné. Jako další nesrovnalost považují průběh objemu pro tlaky 0,65 MPa a 0,6 MPa. Při těchto tlacích dochází k chování popírajícímu fyzikální vlastnosti vlnovce, kde při stlačení vlnovce při vyšším tlaku se objem zmenšuje. Mělo by ovšem dojít k většímu roztažení vlnovce, a tedy i k většímu objemu. Do modelu bylo použito průběhů pro tlaky 0,4 MPa a 0,45 MPa. Měření u těchto tlaků odpovídá předpokládanému chování vlnovce jak dle teorie [2], tak dle katalogových hodnot. Průběhy objemu byly též proloženy regresní křivkou 3. řádu pro model A. Pro model B bylo použito proložení plochou. V příloze II.J je uveden graf proložení regresními křivkami. Polynom regrese použitý v modelu A je uveden ve vzorci (4.3.2).

$$V(x) = 4,670 \cdot 10^{-2} \cdot x^3 - 3,650 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 1,402 \cdot x + 2,277 \cdot 10^{-4} \quad (4.3.2)$$

Pro model B bylo použito proložení dle popisu v kapitole 3.2.2 ve vzorci (3.2.2.8). Na následujícím obrázku je vykreslen průběh objemu a jeho regrese použitého v modelu A.



Obr. 4.3.5: Graf použité křivky pro objem do modelu A

## 5 Model

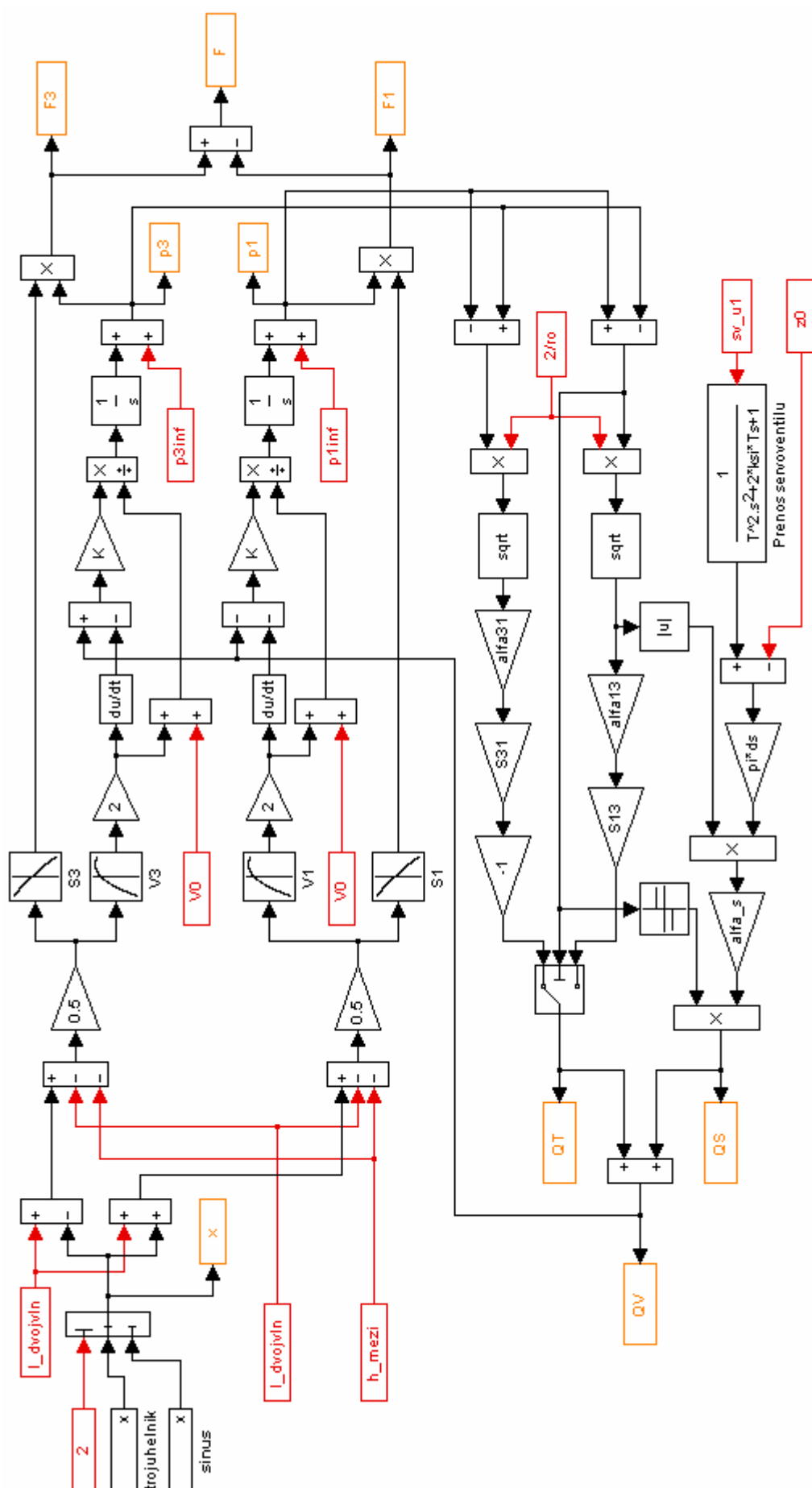
Byly zpracovány dvě verze modelů, a to model A a B. Pro porovnávání výsledků z modelů je použito měření z minulého akademického roku uvedeného v [4]. Výsledky tohoto měření považují za ovlivněné, a proto nelze docílit potřebného semknutí modelu s měřením. Prvním aspektem těchto nepřesností je samotné provedení, kdy pneumatická část tlumiče byla otevřena, a byl tak zaveden předpoklad, že pneumatická část dýchá, a tedy že nemá vliv na hydraulickou část. Tento vliv ale nelze zanedbat, protože dochází jak k tření mezi vodícím členem hydraulické části a přidavným objemem pneumatické části, tak k proudění vzduchu tryskami pneumatického systému. Dále pak jsou tato měření ovlivněna použitými měřicími snímači tlaku a síly, kdy jejich rozsahy byly překračovány a snímač pro snímání tlaku s rozsahem 1,4 MPa byl dokonce zničen, a proto byl vyměněn za snímač s rozsahem 16 MPa, což vneslo další nepřesnosti do měření.

Bylo doporučeno opakování tohoto měření s lépe zvolenými snímači a samotného hydraulického systému. Samotný hydraulický systém nemohl být změřen, protože nebylo umožněno rozebrání tlumiče. Zopakování měření stejným postupem jako v minulém akademickém roce s lépe zvolenými snímači neproběhlo z časových důvodů.

Diplomant Pavel Cohorna vytvořil verzi modelu s proměnným koeficientem stlačitelnosti oleje v závislosti na tlaku  $K(p)$ . Tento popis po konzultaci v hydrodynamické laboratoři a s vedoucí diplomové práce považují za chybný a díky optimalizaci tohoto koeficientu v průběhu simulace bylo dosaženo dobrých výsledků v této verzi modelu, ovšem na úkor fyzikálních vlastností. Tímto parametrem byla nahrazena v té době neznámá charakteristika efektivní plochy vlnovce a roztažnost vlnovce. V modelech A i B je použito konstantního koeficientu  $K$ . Proto porovnání s touto verzí modelu nepovažují za odpovídající. Zhodnocení výsledků z modelů a porovnání je uvedeno v kapitole 5.3.

### 5.1 Model A

Model A vychází z již sestaveného modelu [4]. V tomto modelu byly provedeny opravy v popisu a v programovém provedení. Značný vliv ovšem mělo použití experimentálně zjištěných charakteristik pro efektivní plochu a pro objem. Tyto charakteristiky jsou popsány v kapitole 4.3.



Obr. 5.1.1: Simulační schéma modelu  $A$  v prostředí MATLAB 6.5 simulink



## 5.2 Model B

Druhá verze modelu je sestavena dle popisu uvedeného v kapitole 3.2.2. Na základě tohoto popisu jsem provedl proložení experimentálně zjištěných průběhů změn objemu. Díky vzniklým chybám při měření objemu, jež jsou popsány v kapitole 4.3, bylo použito naměřených hodnot pro natlakování 0,40 MPa a 0,45 MPa. Objem  $V_0$  v zástavbové výšce byl pro tlak 0,4 MPa vypočten dle vztahu (4.2.1). Další nulové objemy pro další natlakování byly zjištěny z měření při tlaku 0,4 MPa. Graf plochy pro objem vlnovce v závislosti na zdvihu  $x$  a tlaku  $p$  je uveden v příloze III.A. Jeho průmět závislosti na zdvihu je uveden v příloze III.B.

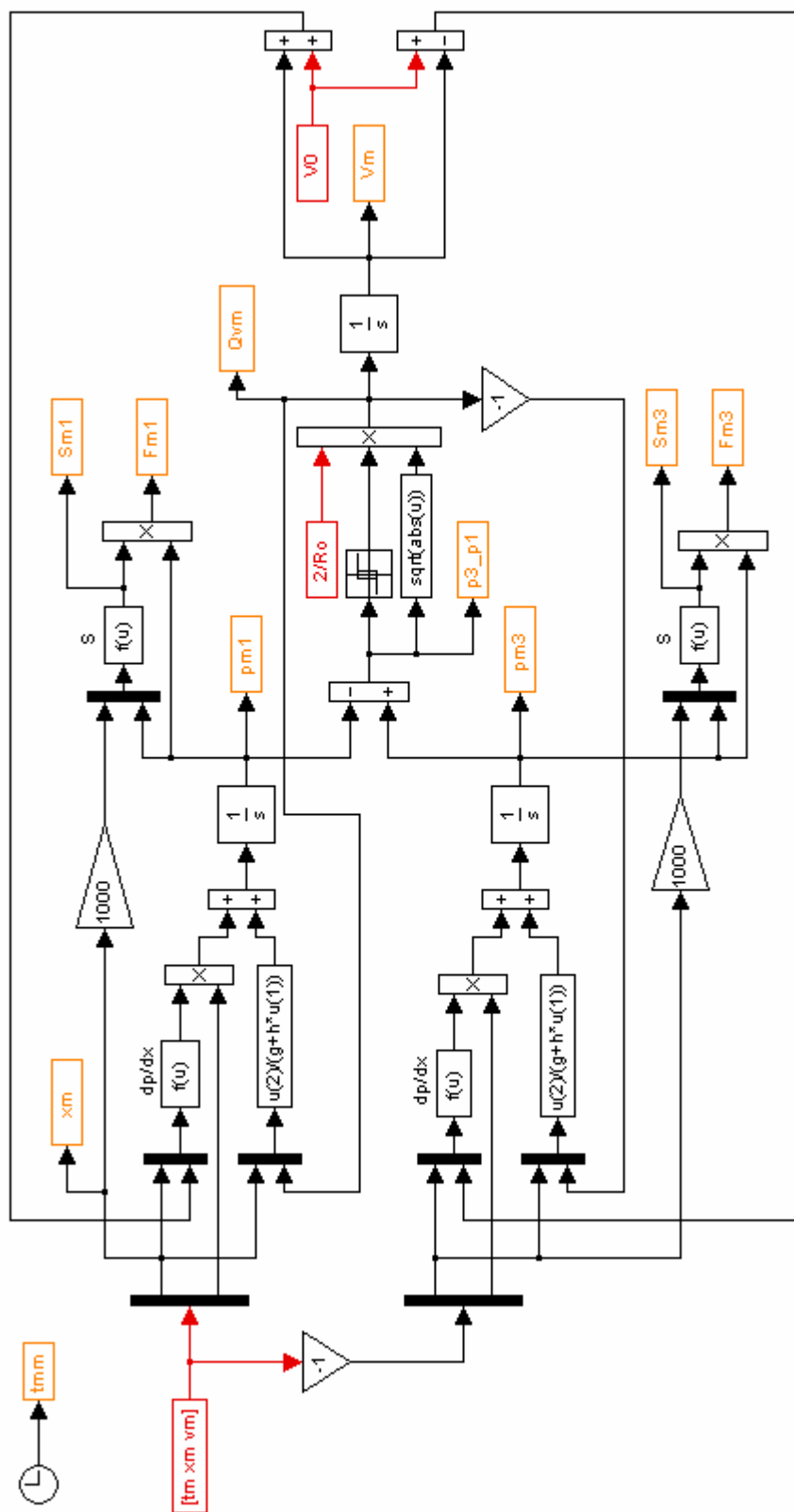
Průběhy efektivní plochy zjištěné z experimentálního měření byly proloženy plochou, charakterizovanou rovnicí:

$$S = a_s + b_s \cdot x + c_s \cdot e^{d_s \cdot x} + g_s \cdot p + h_s \cdot x \cdot p \quad (5.2.1)$$

V příloze III.C najdeme graf závislosti efektivní plochy na zdvihu  $x$  a tlaku  $p$  a v příloze III.D je umístěn graf proložení této závislosti plochou dle rovnice (5.2.1). Nalezené koeficienty  $a_s, b_s, c_s, d_s, g_s, h_s$  pro rovnici plochy proložené skupinou křivek efektivní plochy a  $a, b, c, d, g, h$  jsou uloženy v souborech KoefS.mat a KoefV.mat na přiloženém CD, viz příloha V.

Dle nově sestaveného popisu bylo vytvořeno simulační schéma v prostředí MATLAB 6.5. Na obrázku 5.2.1 je uvedeno toto simulační schéma.

Výsledky simulace modelů jsou uvedeny v následující kapitole 5.3.



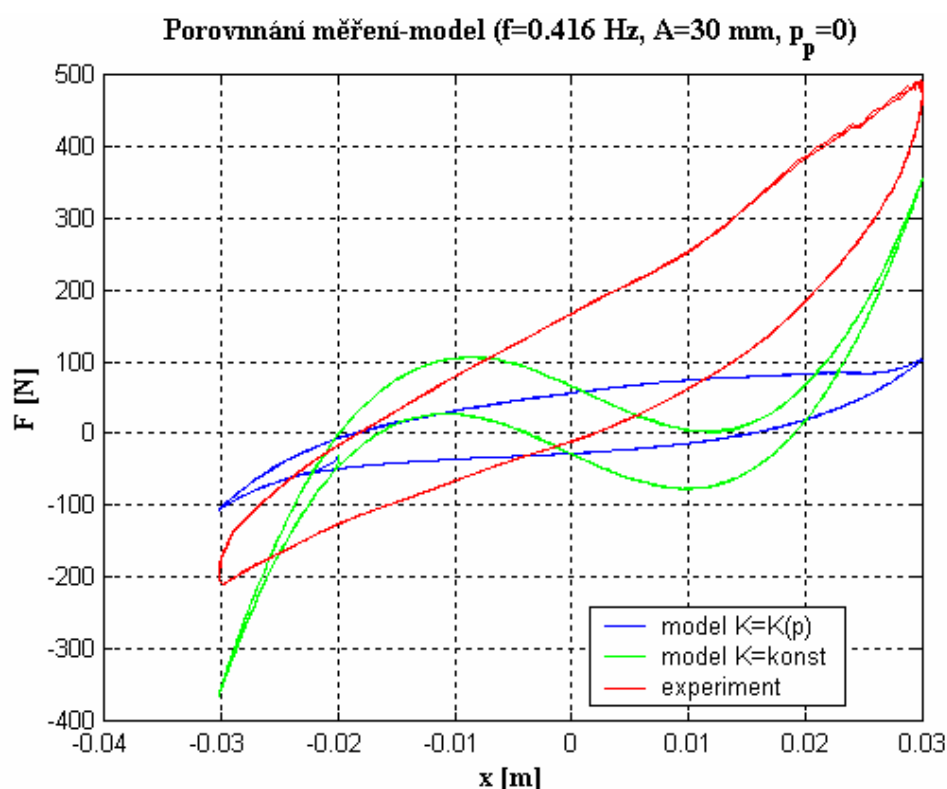
Obr. 5.2.1: Simulační schéma modelu B v MATLAB 6.5 simulink

### 5.3 Porovnání modelů a měření

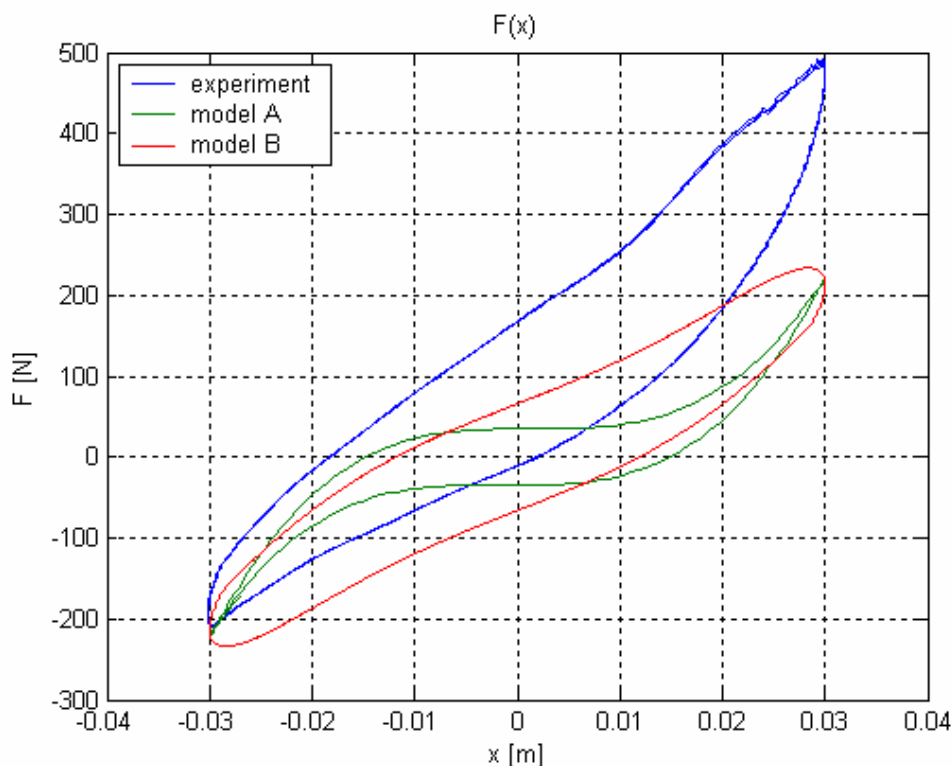
Pro porovnání byly použity grafy uvedené v diplomové práci [4]. Porovnání výsledků je provedeno pro frekvence 0,416 Hz, 0,833 Hz, 1,25 Hz, 1,66 Hz a 3,5 Hz. Další frekvence nejsou v diplomové práci z minulého akademického roku uvedeny. V příloze IV. jsou uvedeny další frekvence, při kterých bylo provedeno měření pro hydraulickou část.

Model vytvořený v minulém akademickém roce byl především nepřesný v závislosti na frekvenci budicího signálu. Při nízkých a vysokých frekvencích je model značně odlišný od naměřených hodnot. Zavedením proměnného koeficientu objemové pružnosti oleje bylo docíleno mnohem lepších výsledků. Ovšem tyto výsledky, jak jsem již uvedl, považuji za zkreslené, jelikož dle fyzikálních vlastností oleje je jeho objemová stlačitelnost s tlakem neměnná. Tímto parametrem byla pouze nahrazena neznalost charakteru efektivní plochy.

Za první zpřesnění tudíž považuji, že obě nové verze modelu pracují s konstantním koeficientem objemové pružnosti oleje. Bylo také dosaženo zlepšení vlastností modelu v závislosti na frekvenci.



Obr. 5.3.1: Graf porovnání měření a modelu z minulého akademického roku při frekvenci buzení 0,416 Hz a amplitudě 0,03 m

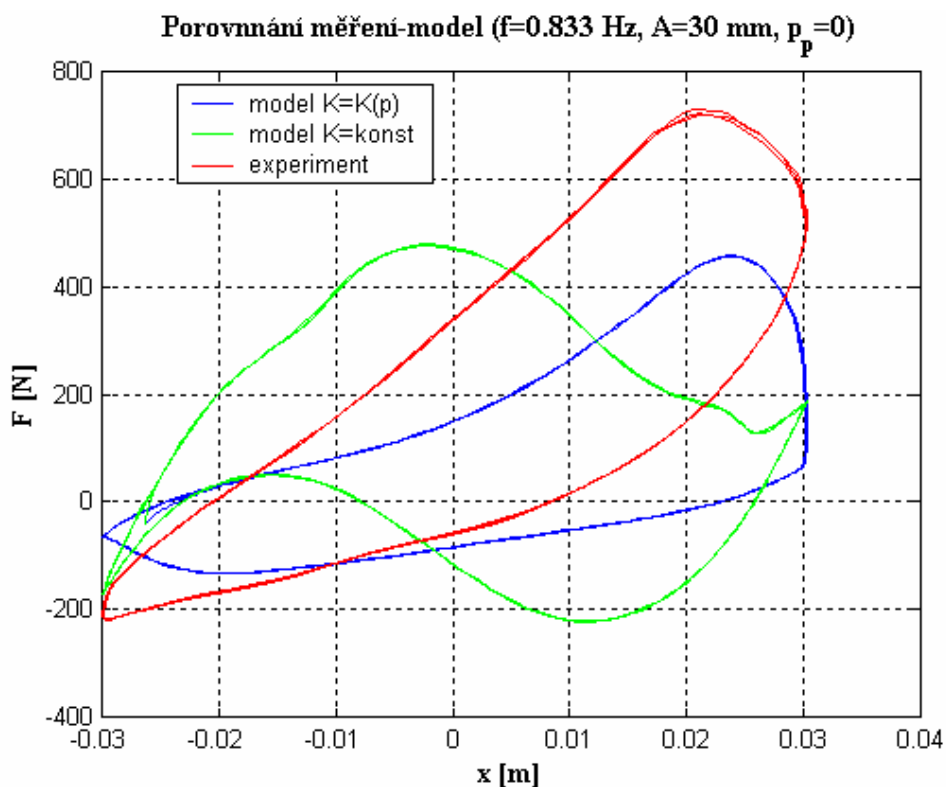


Obr. 5.3.2: Graf porovnání měření, modelu A a modelu B při frekvenci buzení 0,416 Hz a amplitudě 0,03 m

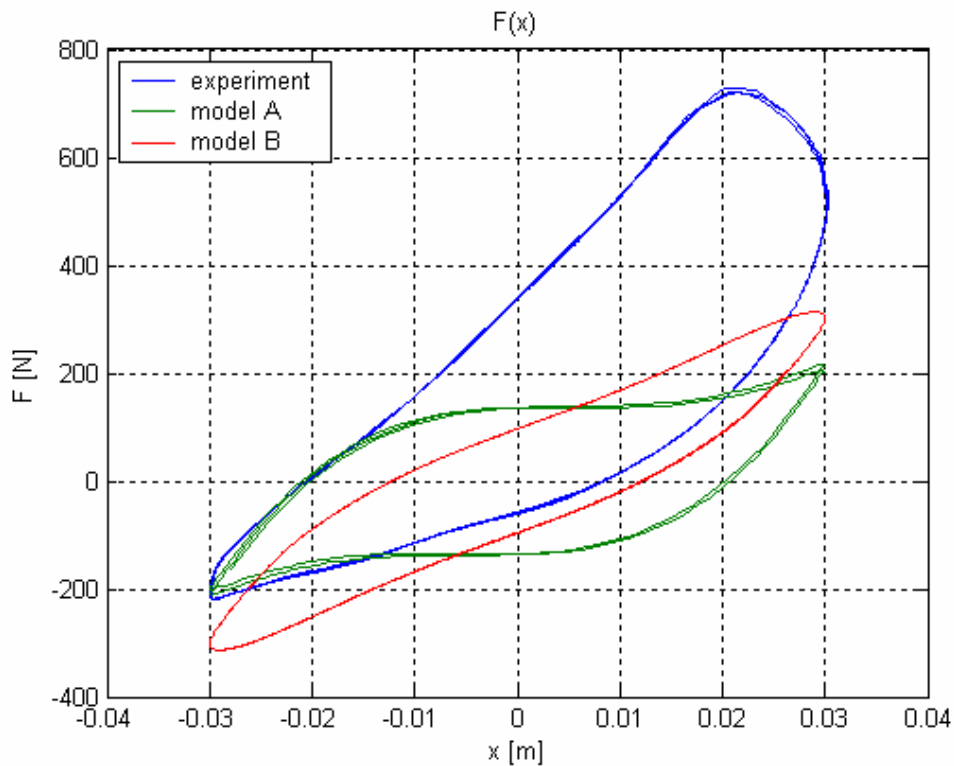
Na obrázku (5.3.1) je uveden graf porovnání měření a modelu použitého v [4] a na obrázku (5.3.2) jsou vykresleny výsledky obou nových modelů a měření.

Jak je patrné z grafů při této frekvenci, oba modely přinášejí zlepšení, především pak model B. Model B se při nižších frekvencích chová mnohem lépe než model starý. Horní část křivky měření, tedy v oblasti roztahení vlnovců, je protažena do vyšších hodnot. Domnívám se, že protažení je způsobeno působením pneumatické části při měření, ale i samotné měření nepovažuji za plně odpovídající realitě. Předpokládám, že vlivy způsobené pneumatickou částí se po zapojení této části eliminují. Proto se také stává hlavním parametrem posouzení především využití modelů A i B v celkovém modelu. Tento model a jeho porovnání ovšem není předmětem méj diplomové práce, a proto nemohu objektivně posoudit, zda do sestaveného modelu hydraulické části bude nutno zahrnout další zpřesnění.

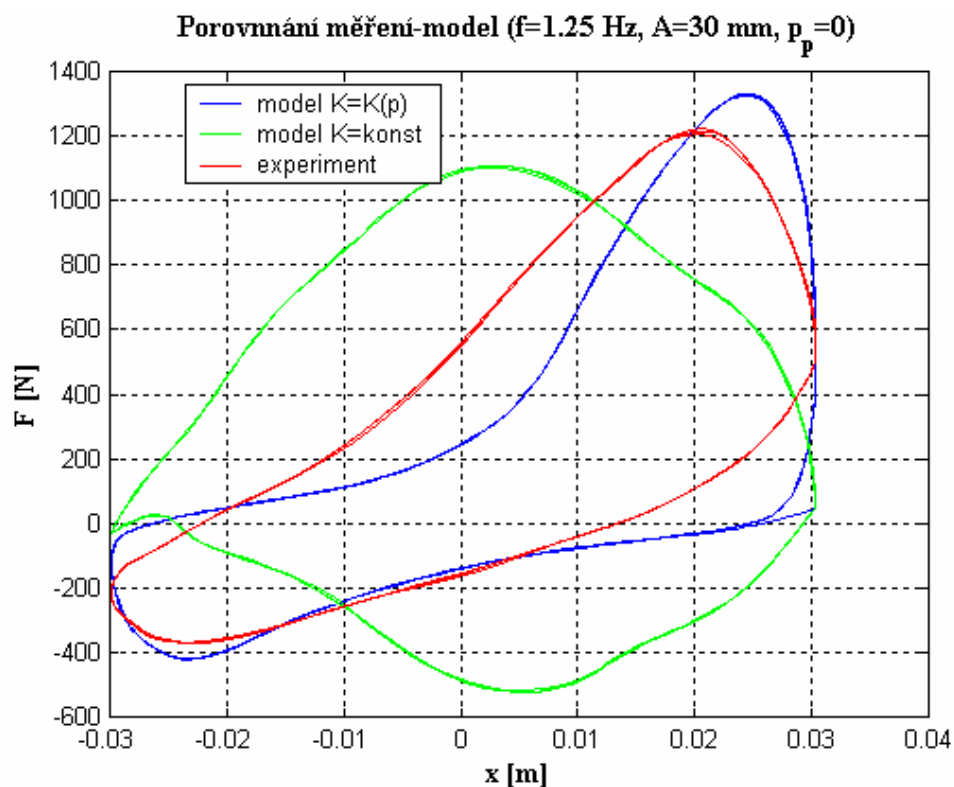
Na dalších obrázcích jsou vykreslena porovnání pro další frekvence buzení, a to až do frekvence 1,66 Hz.



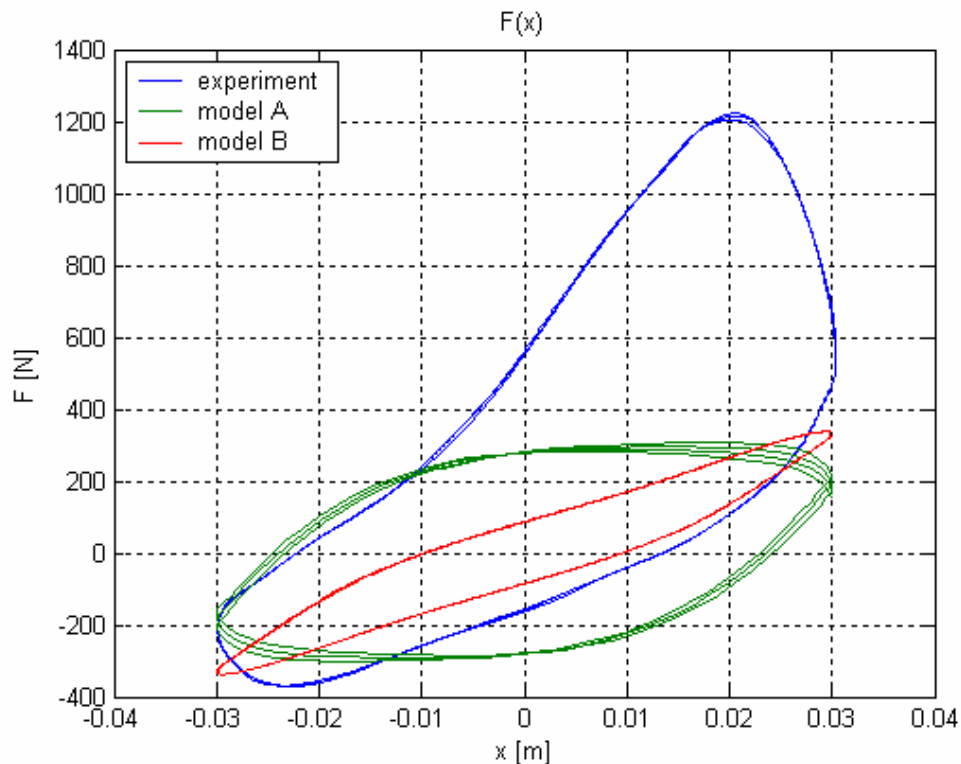
Obr. 5.3.3: Graf porovnání měření a modelu z minulého akademického roku při frekvenci buzení 0,833 Hz a amplitudě 0,03 m



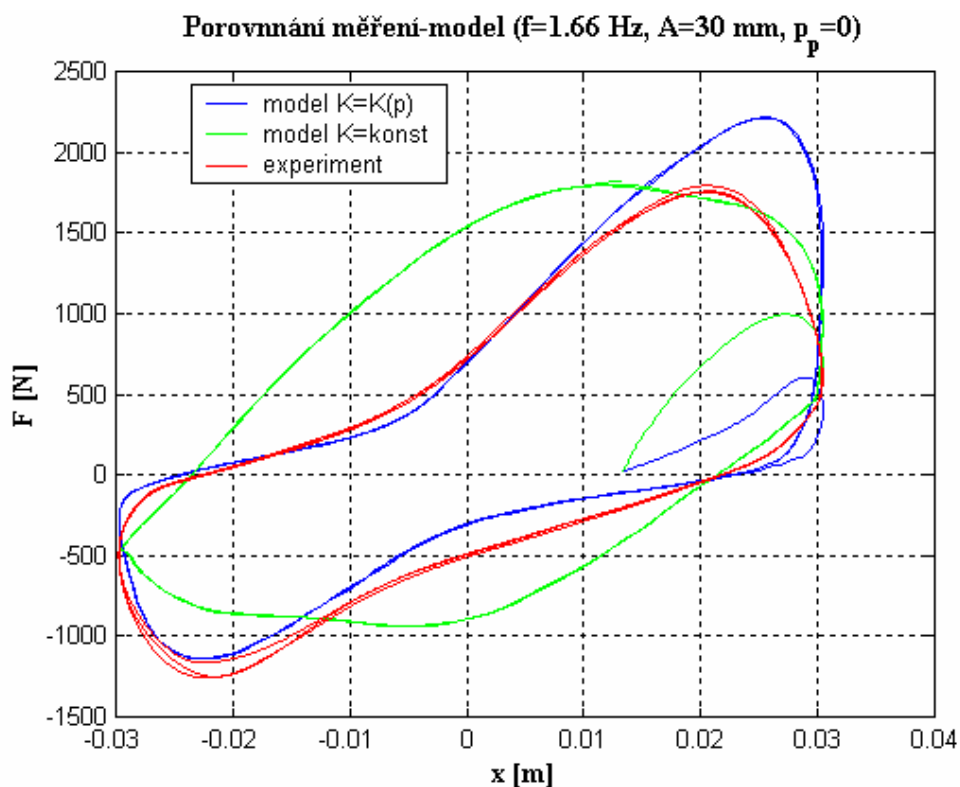
Obr. 5.3.4: Graf porovnání měření, modelu A a modelu B při frekvenci buzení 0,833 Hz a amplitudě 0,03 m



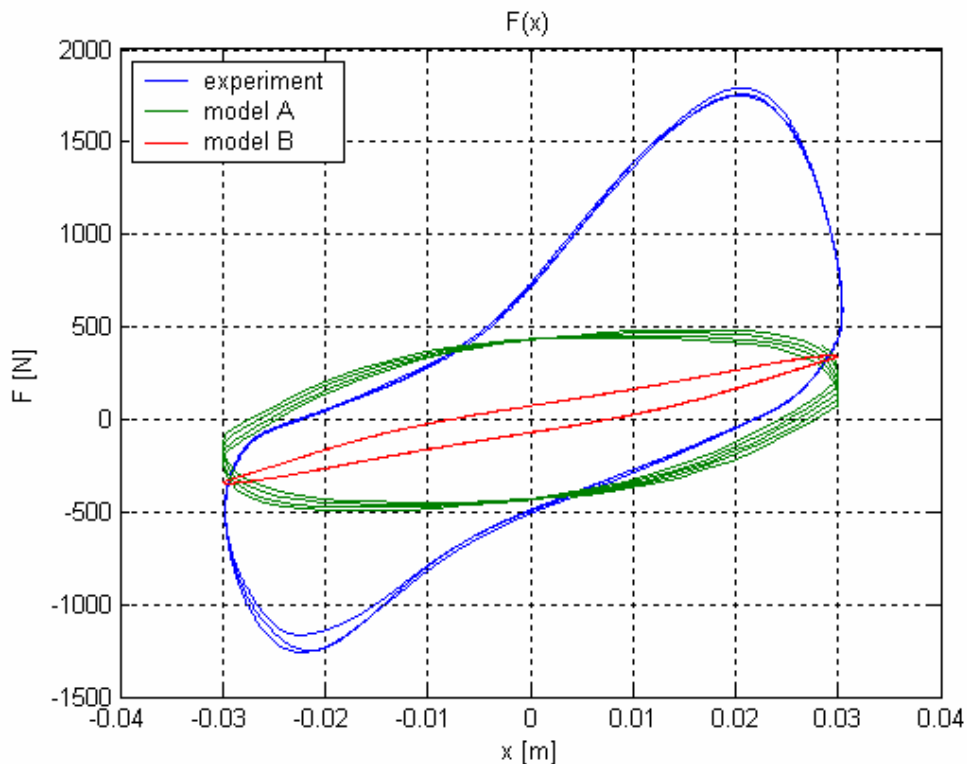
Obr. 5.3.5: Graf porovnání měření a modelu z minulého akademického roku při frekvenci buzení 1,25 Hz a amplitudě 0,03 m



Obr. 5.3.6: Graf porovnání měření, modelu A a modelu B při frekvenci buzení 1,25 Hz a amplitudě 0,03 m



Obr. 5.3.7: Graf porovnání měření a modelu z minulého akademického roku při frekvenci buzení 1,66 Hz a amplitudě 0,03 m



Obr. 5.3.8: Graf porovnání měření, modelu A a modelu B při frekvenci buzení 1,66 Hz a amplitudě 0,03 m

Jak je patrné z výše uvedených obrázků s grafy, model A je ve frekvenčním rozsahu přesnější a při vyšších frekvencích odpovídá více měřeným hodnotám než model B. V příloze IV. jsou uvedeny další frekvence, na kterých byl model A i B zkoušen. Model A se se zvyšující frekvencí zhoršuje, ovšem stále zachovává částečnou podobnost. Pro model B, jak je patrné již z obrázku (5.3.8) a dále pak z příloh IV.B a IV.D, přesnost se zvyšující se frekvencí klesá a při frekvencích 3.5 Hz a 5.0 Hz již neodpovídá v žádném směru. Toto selhání je pravděpodobně způsobeno charakteristikami objemu, kde u modelu A bylo využito jedné charakteristiky, a to pro tlak 0,4 MPa, u které bylo provedeno doplňující měření. Ovšem pro model B je potřebné vyjádření rovnice plochy proložené závislostí změny objemu na tlaku  $p$  a zdvihu  $x$ . Změny v závislosti na tlaku byly korektně proměřeny jen pro tlaky 0,4 MPa, 0,45 MPa. Pro další tlaky byly tyto charakteristiky konzultovány a jejich pravdivost byla zpochybněna. Proto jsem přistoupil k náhradě vyšších tlaků. A tato náhrada má vliv na celkový model.



## 6 Závěr

Diplomová práce se zabývala zpřesněním již sestaveného matematického modelu pružicí a tlumicí jednotky navržené v Hydrodynamické laboratoři. Jedním z hlavních úkolů pro zpřesnění modelu se stalo zjištění experimentálních charakteristik použitých vlnovce, a to efektivní plochy a objemu vlnovce v závislosti na zdvihu a přetlaku.

Měření efektivní plochy vlnovce proběhlo bez vážných komplikací a je možné je považovat, dle poznatků uvedených v literatuře a průměrných hodnot z katalogu vlnovce, za reálné. Prvním problémem se stalo měření objemu vlnovce v závislosti na zdvihu a přetlaku. Změny objemu se pohybují v řádu  $10^{-5} \text{ m}^3$ . První měření bylo znemožněno použitými tenzometry pro vážení kapaliny v odměrném válci, protože byl překročen jejich práh citlivosti. Při doplňujícím měření nebylo možné proměřit závislost pro nižší tlaky z důvodu citlivosti. Pro vyšší tlaky docházelo k snímání hodnot, které po konzultaci nelze považovat za reálné.

Doporučuji proto v dalších krocích zpřesňování modelu proměřit objem při nízkých tlacích, tedy pro tlaky nižší než 0,35 MPa a pro vyšší tlaky od 0,55 MPa. Při těchto měřeních by mělo být použito tenzometrů s vyšší citlivostí.

Těchto experimentálně zjištěných hodnot bylo použito jak v modelu A, tak i v modelu B. Pro model A bylo využito měření objemu při tlaku 0,4 MPa a 0,45 MPa. Model A také vykazuje mnohem větší přesnost při vyšších frekvencích, nežli model B, což je způsobeno závislostí modelu B na měřeních objemu při vyšších tlacích.

U modelu B bylo provedeno proložení zjištěných průběhů objemu v závislosti na zdvihu a tlaku regresní plochou. Tato závislost nebyla, jak bylo uvedeno výše, proměřena v dostatečném rozsahu. Tento aspekt může způsobovat nepřesnost modelu B při vyšších frekvencích.

Porovnání výsledků modelů a experimentálních průběhů zjištěných v minulém akademickém roce je poznamenáno možnou nepřesností měření na samotném pružicím a tlumicím prvku. Toto měření předpokládá, že při otevření pneumatické části, tedy když necháme pneumatickou část při měření propojenou s okolním prostředím, můžeme tuto část zanedbat a zjištěné průběhy používat jako měření na samostatném hydraulickém systému. Domnívám se, že nelze takto zanedbat vliv pneumatické části při tomto měření a porovnání s těmito průběhy považuji za zkreslené. Opakované provedení tohoto měření za využití lépe zvolených snímačů nebylo z časových a technických důvodů provedeno.

Pro objektivní zhodnocení výsledků by bylo nutné použít navržené modely v celkovém modelu, tedy i s pneumatickou částí, což nebylo cílem této diplomové práce. V této práci bylo dosaženo zpřesnění ve frekvenčním spektru, kdy při nízkých i vyšších frekvencích především model A dosahuje lepších výsledků než model z minulého akademického roku. U modelu B je vypracována jiná varianta popisu chování pracovních komor. U tohoto modelu je patrný vliv změřených charakteristik objemu a po jejich zpřesnění by mohlo dojít i k zpřesnění modelu B při vyšších frekvencích.

## 7 Literatura

- [1] Noskievič, P.: Modelování a identifikace systémů, Montanex Ostrava, 1999, ISBN 80-7225-030-2
- [2] Krejčíř, O.: Pneumatická vibroizolace, VŠST Liberec, 1986
- [3] Prokop, J.: Stanovení charakteristik vlnovcových pneumatických pružin na základě experimentálních měření, TU Liberec, 2002
- [4] Cohorna, P.: Identifikace hydropneumatického tlumicího a pružicího prvku osobního automobilu.
- [5] Noskievič, J. a kol.: Mechanika tekutin, SNTL Praha, 1987
- [6] Noskievič, J.: Hydromechanika, VŠB Ostrava, 1986
- [7] Šklíba, J., Barbora, J.: Simulační a experimentální výzkum řízené pružicí a tlumicí jednotky - výzkumná zpráva, KST, TU v Liberci, 2000

## Seznam obrázků

*Obr. 2.1.1: Konstrukční uspořádání sestavy*

*Obr. 3.1.3: Náhradní schéma hydraulické části*

*Obr. 3.4.1.1: Schéma vlnovcové pružiny*

*Obr. 3.2.2.1: Grafické vyjádření změny tlaku v závislosti na zdvihu při konstantním objemu pracovní komory*

*Obr. 3.2.2.1: Grafické vyjádření změny tlaku v závislosti na objemu při konstantním zdvihu*

*Obr. 3.4.1.1: Realizace odporového vedení tryskou*

*Obr. 3.3.2.1: Realizace servoventilu*

*Obr. 4.1: Vlnovec typu DUNLOP 3 x 2  $\frac{3}{4}$*

*Obr. 4.2: Schéma měření silových účinků*

*Obr. 4.3: Celkové schéma měřicího systému*

*Obr. 4.4: Fotografie celého měřicího zařízení*

*Obr. 4.2.1: Graf závislosti exp. změřených změn objemu  $V[m^3]$  na zdvihu  $x[mm]$  při tlaku 0,4MPa*

*Obr. 4.2.2: Podoba výstupního souboru*

*Obr. 4.2.3: Podoba výstupního souboru*

*Obr. 4.2.4: Název výstupního souboru pro tlak 0,25 MPa a zdvih  $\pm 30$  mm*

*Obr. 4.3.1: Graf vývoje tlaků uvnitř vlnovce v závislosti na zdvihu  $x$  při různých natlakováních v zástavbové výšce  $h_0$*

*Obr. 4.3.2: Graf silových účinků vlnovce v závislosti na zdvihu  $x$  při různých natlakováních v zástavbové výšce  $h_0$*

*Obr. 4.3.3: Graf efektivní plochy a její regrese pro různé natlakování při zástavbové výšce  $h_0$*

*Obr. 4.3.4: Graf experimentálně zjištěných změn objemu*

*Obr. 4.3.5: Graf použité křivky pro objem do modelu A*

*Obr. 5.1.1: Simulační schéma modelu A v prostředí MATLAB 6.5 simulink*

*Obr. 5.2.1: Simulační schéma modelu B v MATLAB 6.5 simulink*

*Obr. 5.3.1: Graf porovnání měření a modelu z minulého akademického roku při frekvenci buzení 0,416 Hz a amplitudě 0,03 m*

*Obr. 5.3.2: Graf porovnání měření, modelu A a modelu B při frekvenci buzení 0,416 Hz a amplitudě 0,03 m*

*Obr. 5.3.3: Graf porovnání měření a modelu z minulého akademického roku při frekvenci buzení 0,833 Hz a amplitudě 0,03 m*

*Obr. 5.3.4: Graf porovnání měření, modelu A a modelu B při frekvenci buzení 0,833 Hz a amplitudě 0,03 m*

*Obr. 5.3.5: Graf porovnání měření a modelu z minulého akademického roku při frekvenci buzení 1,25 Hz a amplitudě 0,03 m*

*Obr. 5.3.6: Graf porovnání měření, modelu A a modelu B při frekvenci buzení 1,25 Hz a amplitudě 0,03 m*

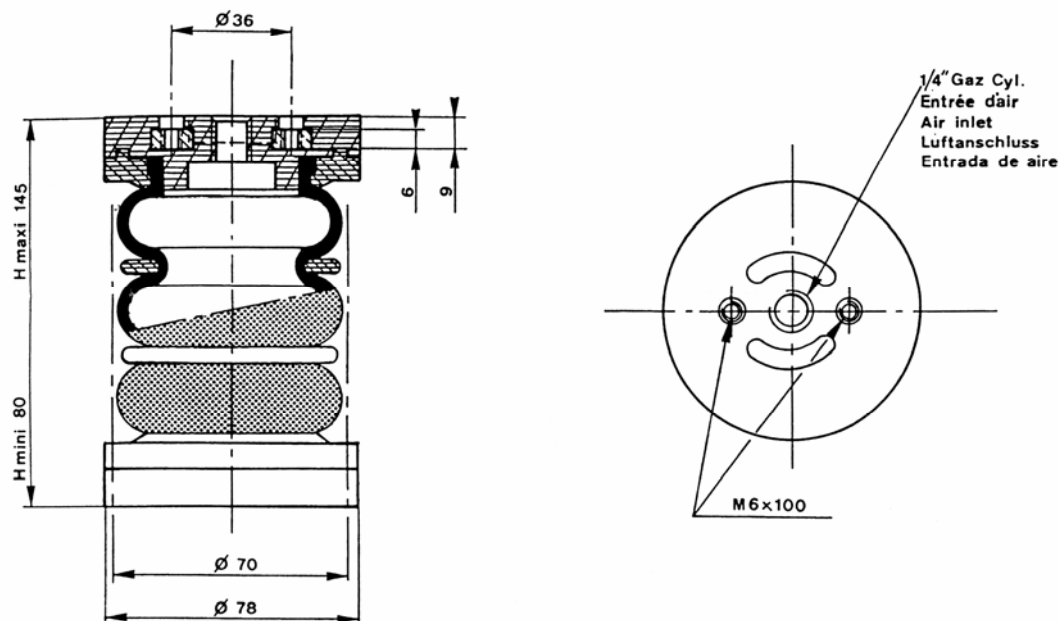
*Obr. 5.3.6: Graf porovnání měření, modelu A a modelu B při frekvenci buzení 1,25 Hz a amplitudě 0,03 m*

*Obr. 5.3.7: Graf porovnání měření a modelu z minulého akademického roku při frekvenci buzení 1,66 Hz a amplitudě 0,03 m*

*Obr. 5.3.8: Graf porovnání měření, modelu A a modelu B při frekvenci buzení 1,66 Hz a amplitudě 0,03 m*

## Příloha I. – Vlastnosti vlnovců

## Příloha I.A: Katalog měřeného vlnovce

SOUFFLET . BELLOW . BALG . FUELLE  $2''^{3/4} \times 3$ 

Ø maxi de la membrane	Max Ø of membrane	Max Ø der membrane	Ø maximo del membrana	mm	78
Hauteur mini	Height mini	Höhe mini	altura mini	mm	80
Hauteur maxi	Height maxi	Höhe maxi	Altura maxi	mm	145
Course totale	Totale stroke	Gesamter federweg	Carrera maxima	mm	65
Hauteur statique	Static height	Statische Höhe	Altura estática	mm	115
Surface efficace *	Effective area *	Wirksame flaeche *	Superficie efectiva *	cm <sup>2</sup>	23
Charge statique *	Static load *	Statische belastung *	Carga estática *		
à 0,1 MPa	a 0,1 MPa	à 0,1 MPa	a 0,1 MPa	daN	23
à 0,2 MPa	a 0,2 MPa	à 0,2 MPa	a 0,2 MPa	daN	46
à 0,3 MPa	a 0,3 MPa	à 0,3 MPa	a 0,3 MPa	daN	69
à 0,4 MPa	a 0,4 MPa	à 0,4 MPa	a 0,4 MPa	daN	92
à 0,5 MPa	a 0,5 MPa	à 0,5 MPa	a 0,5 MPa	daN	115
à 0,6 MPa	a 0,6 MPa	à 0,6 MPa	a 0,6 MPa	daN	138
à 0,7 MPa	a 0,7 MPa	à 0,7 MPa	a 0,7 MPa	daN	161
Fréquence naturelle *	Natural frequency *	Eigenfrequenz *	Frecuencia natural *	Hz	3,58
à 0,1 MPa	a 0,1 MPa	bei 0,1 MPa	a 0,1 MPa		
Rigidité à 0,1 MPa	Stiffness at 0,1 MPa	Steifigkeit bei 0,1 MPa	Rigided a 0,1 MPa	daN/mm	1,19
Poids du coussin	Spring weight	Gewicht der feder	Peso del colchón	kg	0,280

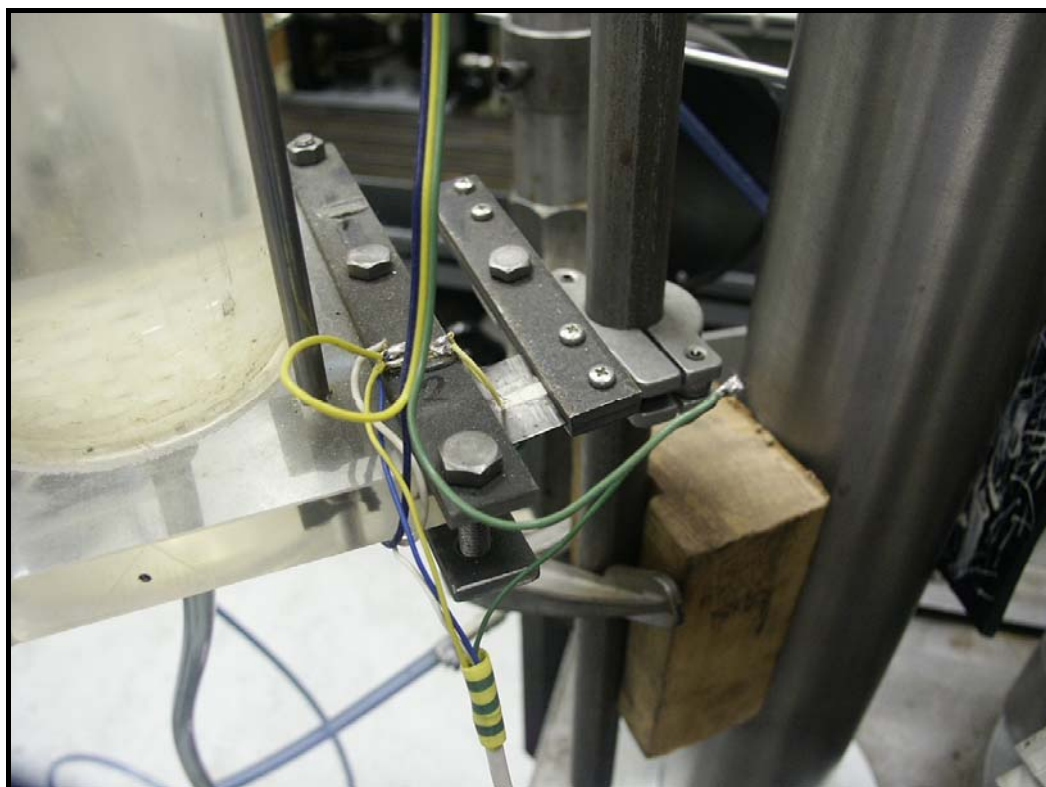
\* Données relatives  
à la hauteur statique\* Data concerning at  
static height\* Data bezüglich  
statistischen Höhe\* Datos en relación  
a la altura estática

## Příloha II. – Měření vlnovců

### Příloha II.A: Fotografie použitých tenzometrů a odměrného válce



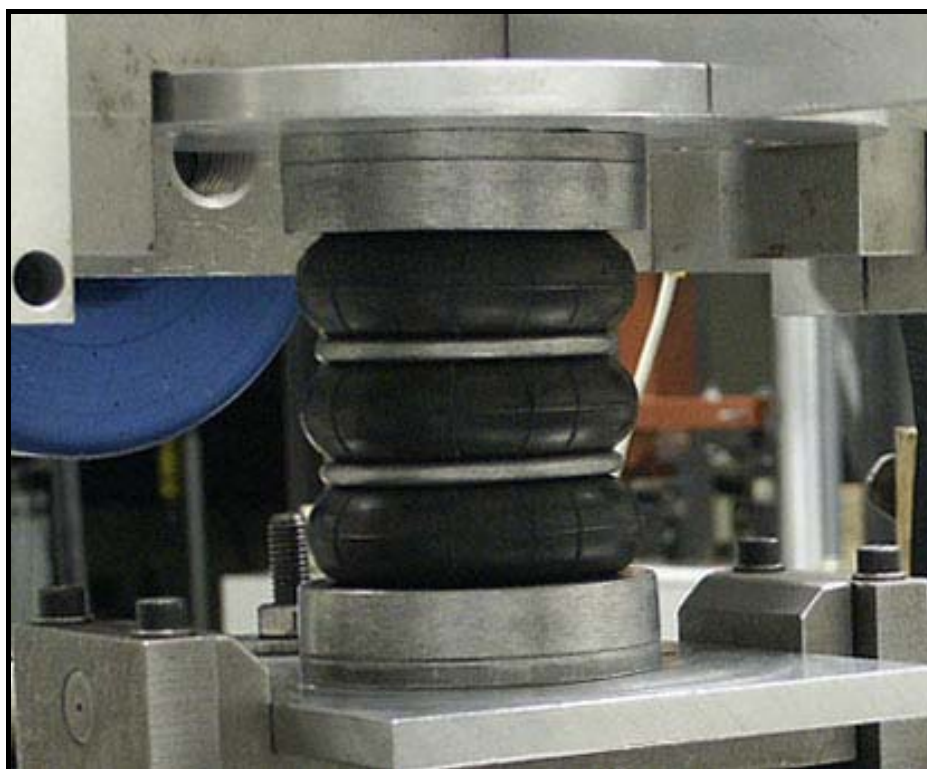
### Příloha II.B: Detail použitých tenzometrů



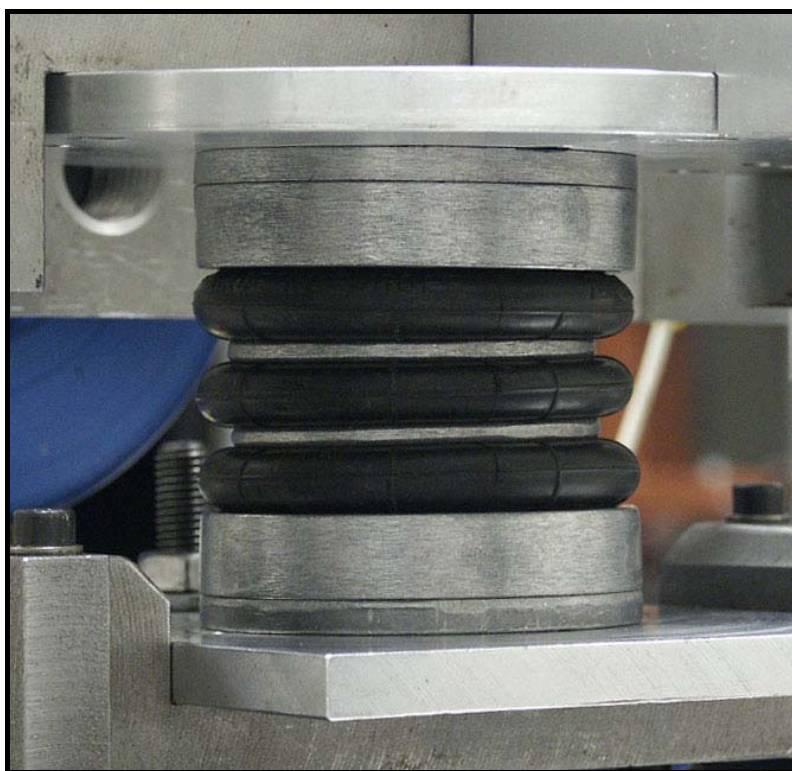
**Příloha II.C: Vlnovec v maximální výšce  $h_{max}$**



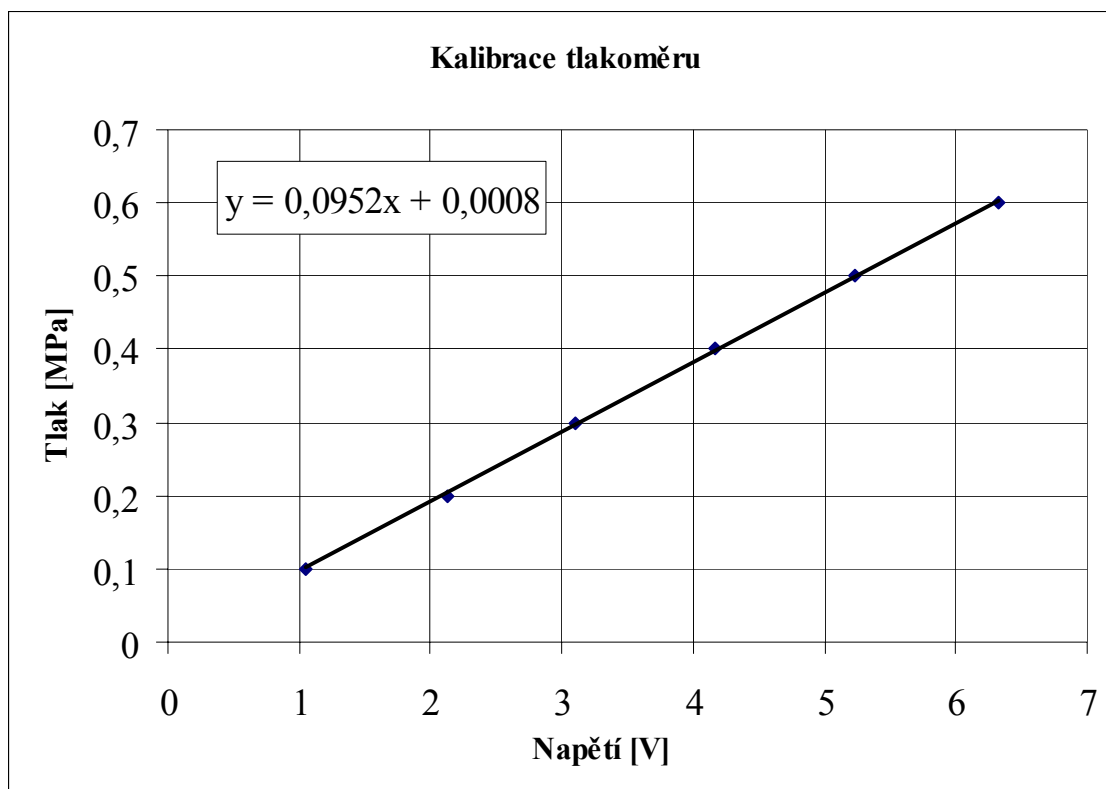
**Příloha II.D: Vlnovec v zástavbové výšce  $h_0$**



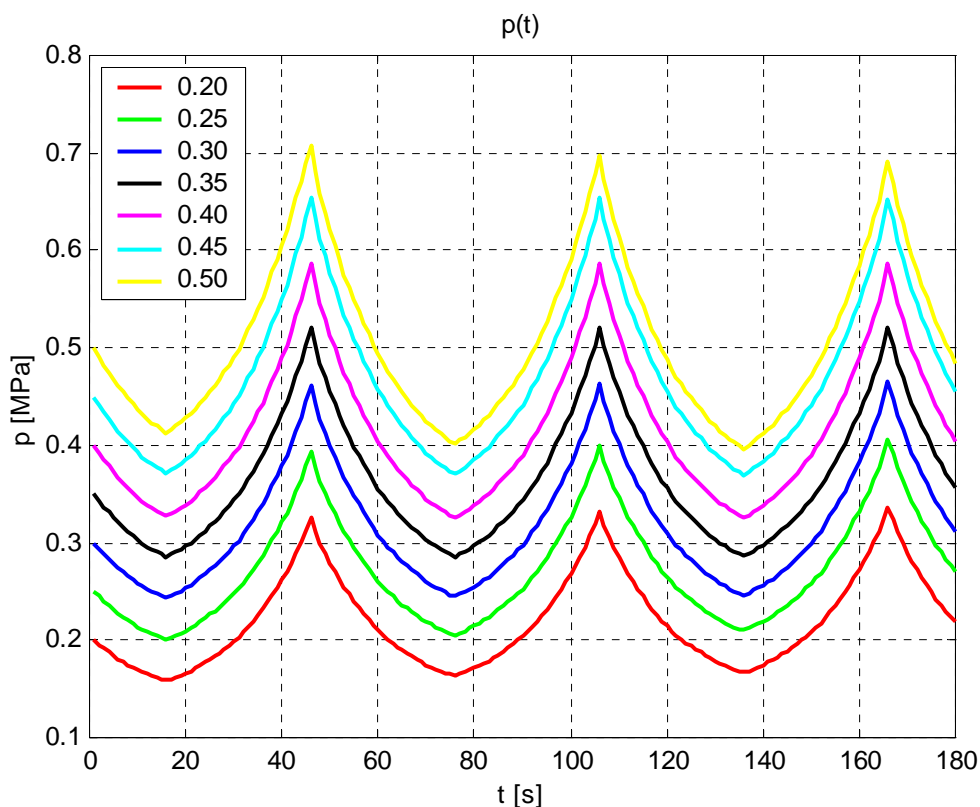


Příloha II.E: Vlnovec v minimální výšce  $h_{min}$ 

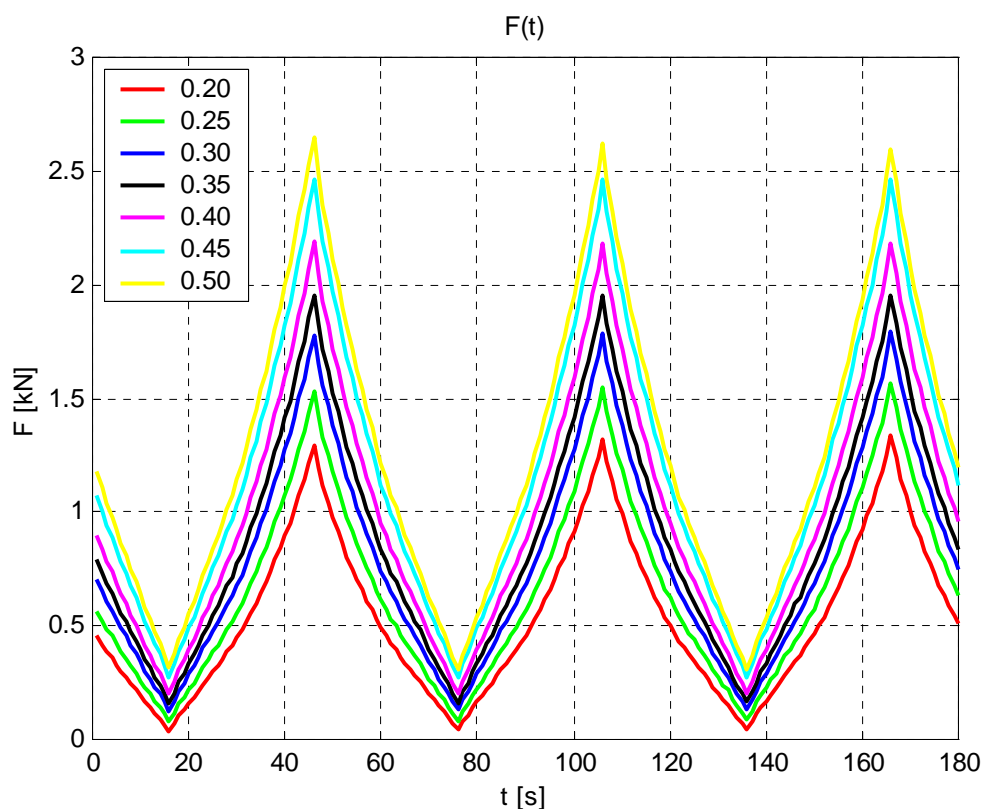
Příloha II.F: Kalibrační křivka tlakoměru



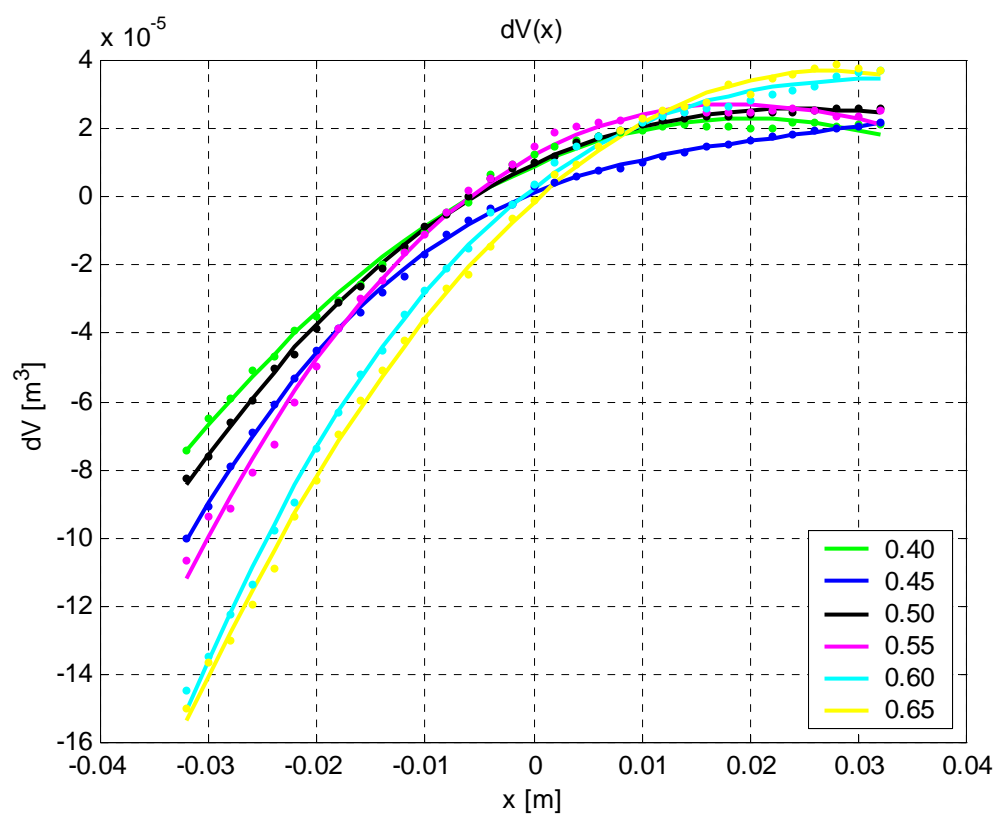
**Příloha II.G: Graf průběhu experimentálně zjištěného tlaku v závislosti na čase pro různá natlakování v zástavbové výšce  $h_0$**



**Příloha II.H: Graf průběhu experimentálně zjištěných silových účinků v závislosti na čase pro různá natlakování v zástavbové výšce  $h_0$**

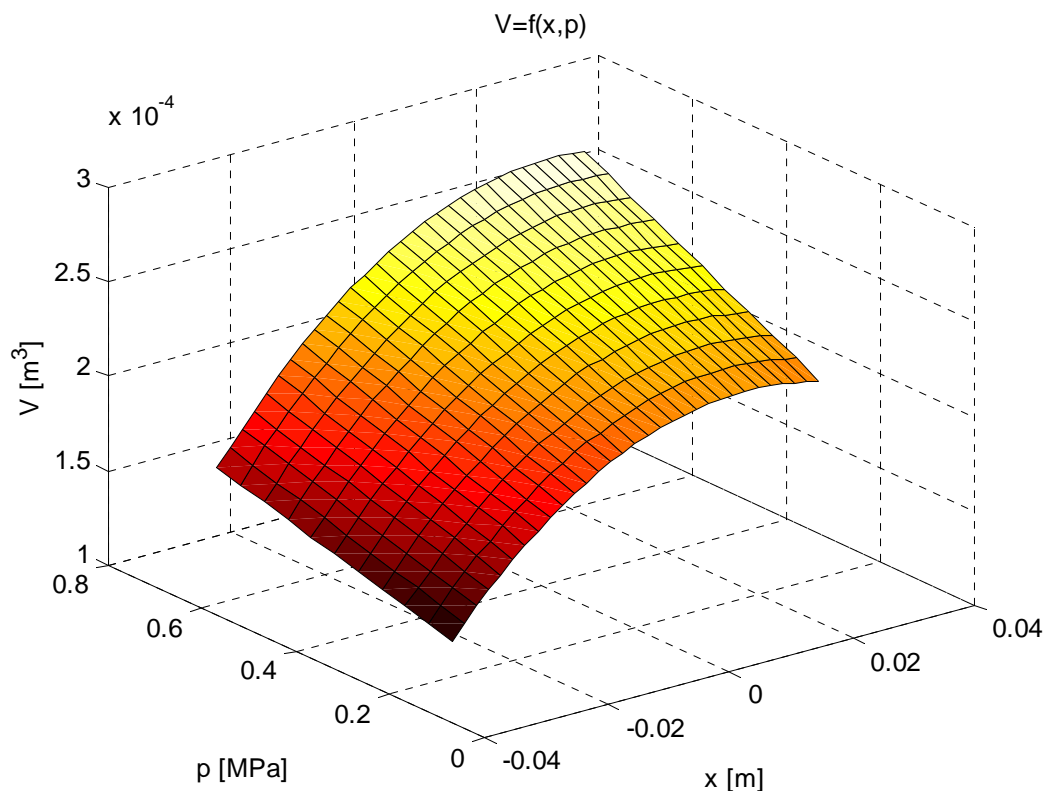


**Příloha II.J: Graf průběhu experimentálně zjištěných změn objemů v závislosti na zdvihu s regresními křivkami**

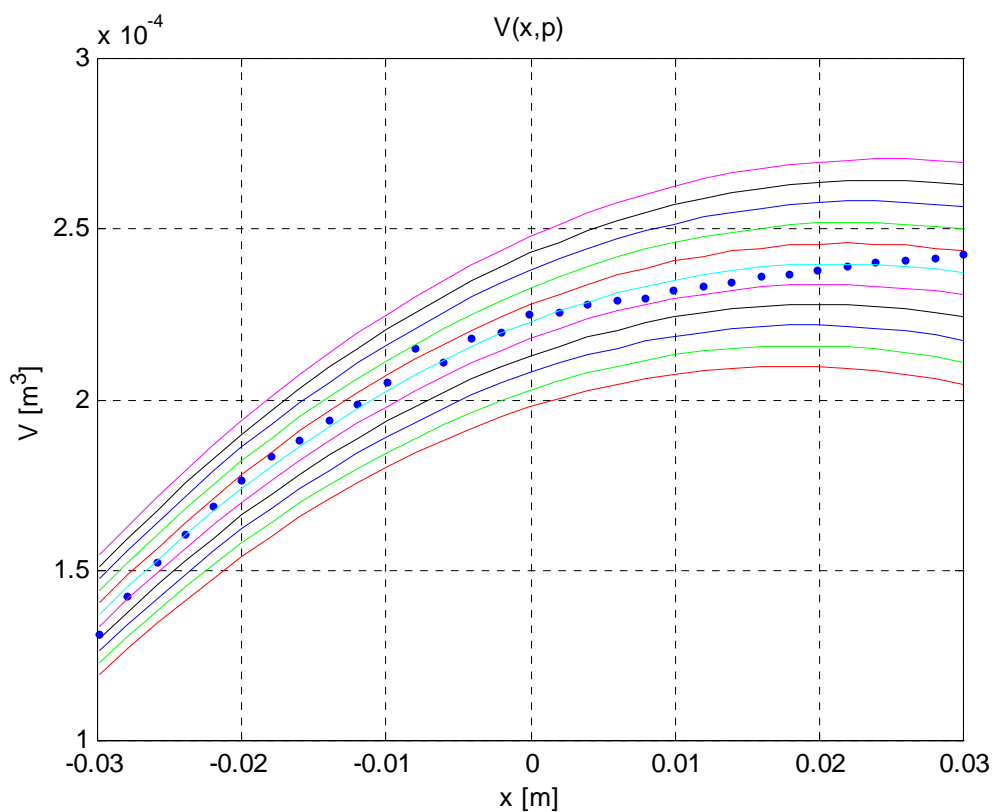


## Příloha III. – Model B

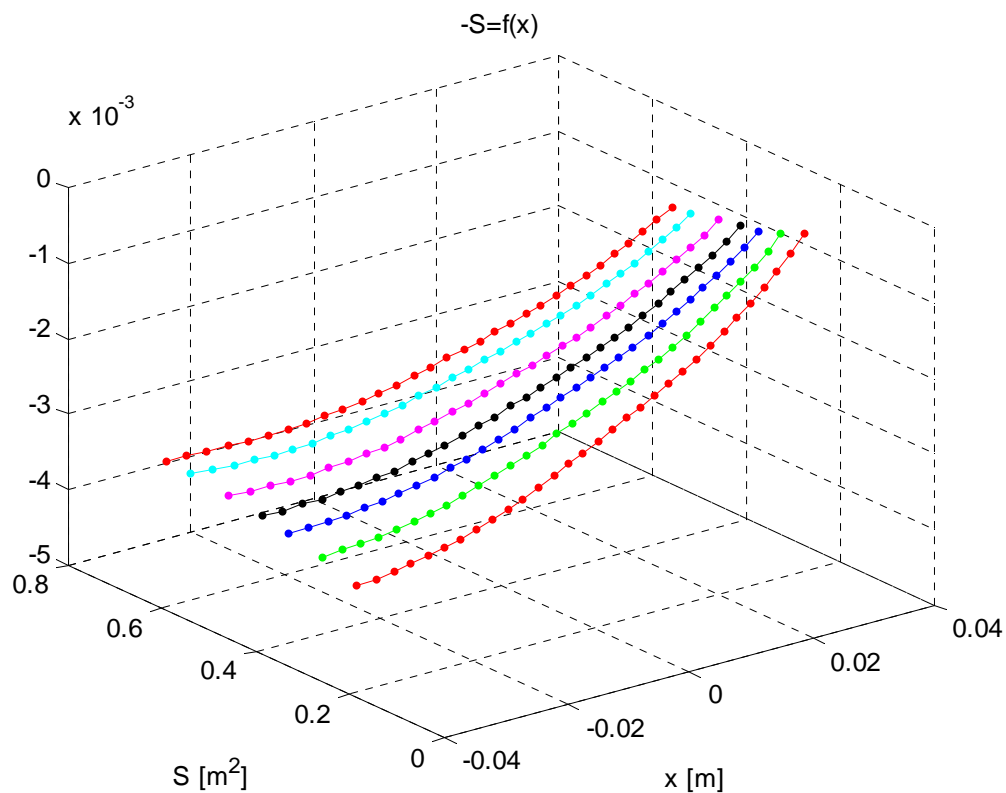
### Příloha III.A: Plocha proložená experimentálně zjištěnými objemy



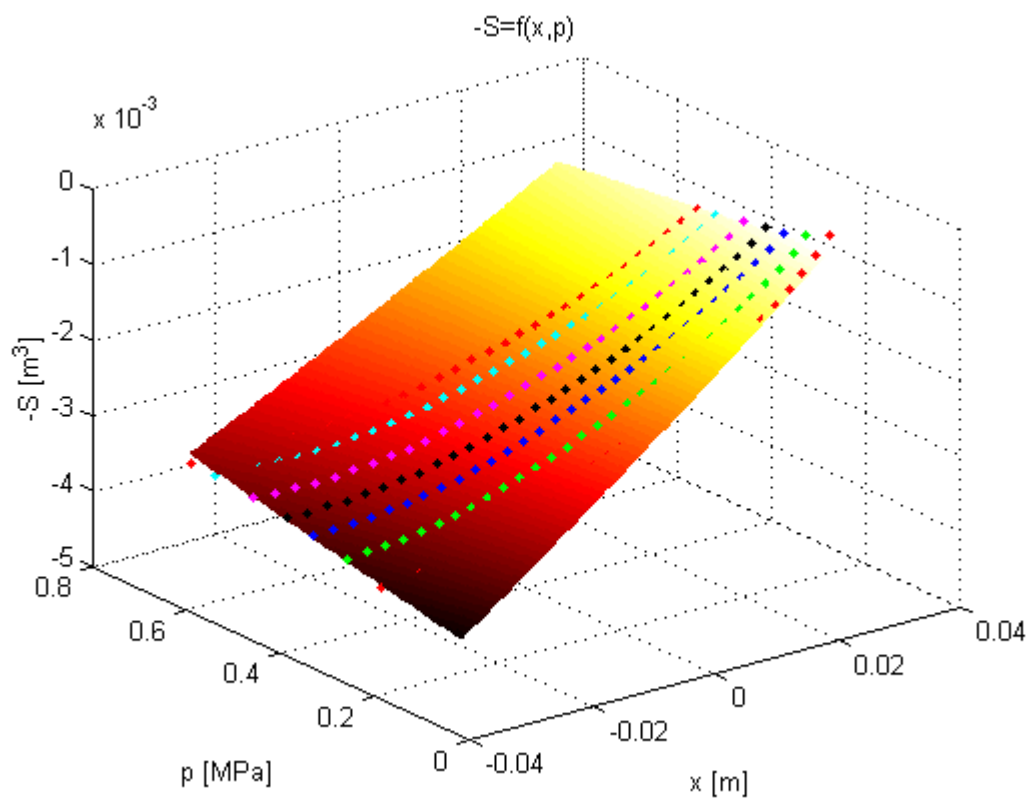
### Příloha III.B: Graf závislosti objemů na zdvihu použitého v modelu B



**Příloha III.C: Graf efektivní plochy zjištěné z měřených hodnot tlakových a silových účinků**

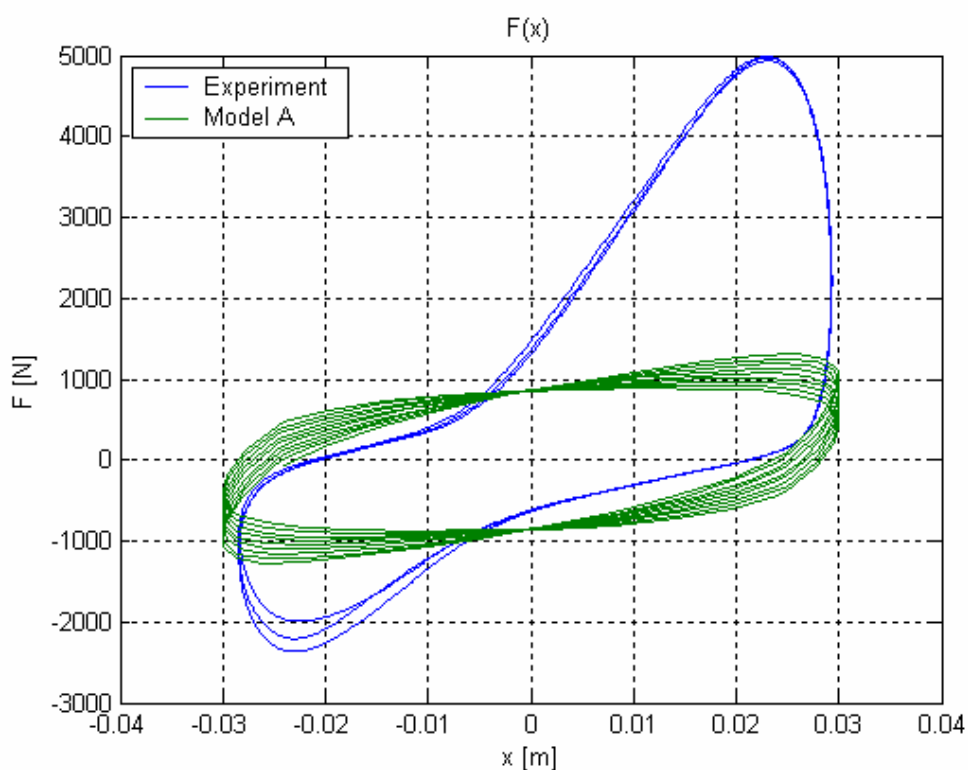


**Příloha III.D: Proložení grafu uvedeného v příloze III.C plochou**

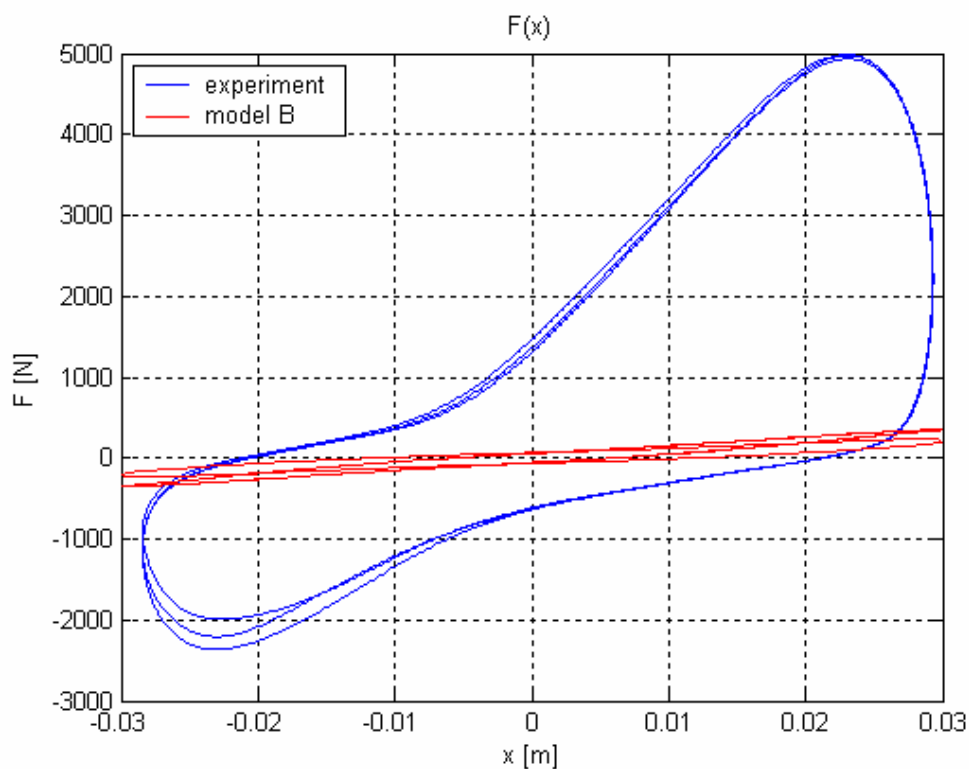


## Příloha IV. – Porovnání výsledků měření a modelů

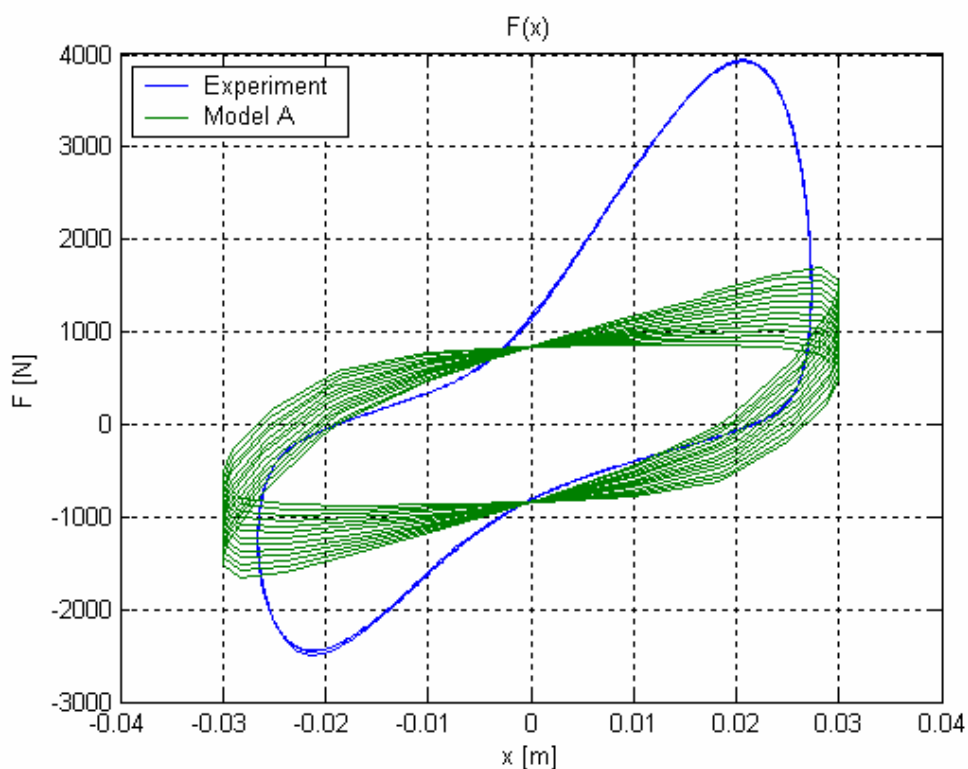
**Příloha IV.A: Graf porovnání měření a modelu A při frekvenci 3,5 Hz a amplitudě 0,03 m**



**Příloha IV.B: Graf porovnání měření a modelu B při frekvenci 3,5 Hz a amplitudě 0,03 m**



**Příloha IV.C: Graf porovnání měření a modelu A při frekvenci 5,0 Hz a amplitudě 0,03 m**



**Příloha IV.D: Graf porovnání měření a modelu B při frekvenci 5,0 Hz a amplitudě 0,03 m**

